

PROYECTO:

PROGRAMA INTERNACIONAL DE CURSOS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN RIGUROSA DE SECADORES INDUSTRIALES

DOCUMENTO:

GUÍA DEL MÓDULO 1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE SECADO INDUSTRIAL

CLIENTE:

PROFESOR ALEXIS MANUEL FANEITE

Junio 2021

SECAVENCA nace el 31/03/2009, como una empresa dedicada a generar conocimientos y tecnología aplicada, a los procesos de separación presentes en una biorrefinería, industria de alimentos o plantas agroindustriales, elaborar proyectos industriales y programas de capacitación en estas áreas.

Fue creada por Profesores Universitarios, amparados bajo el Artículo 59 de la **Movilidad de los Investigadores hacia el entorno Social y Económico**, *Capítulo VI, De la Formación del Talento Humano*, de la **Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación**, vigente en Venezuela, para la fecha.

Nuestros orígenes Universitarios, hace que estemos encantados de formarte dentro del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, exclusivo para Universitarios o Profesionales de la Ingeniería. Su contenido, está basado en casi 20 años de investigación en el área; diseñado con un enfoque andragógico, basado en competencias; gestionado bajo el sistema de calidad educativa ISFEDU CW5000:2019 (equivalente a la norma ISO 9001).

Secadores Industriales de Venezuela C.A. (SECAVENCA)

CONTENIDO

Unidades suplementarias aceptadas por el SI

Simplificación de grandes cantidades (SI)

Reglas de uso del SI

Transformación de unidades de usuario a sistema internacional

4. Notación y transformación de unidades

Notación que se usará en el Programa (overview de todo el Programa)

Unidades coloquiales y unidades de ingeniería (transformación)

5. Clasificación y selección secadores industriales

Clasificación de los secadores

Secadores por convección

Secadores por convección (directos) continuos

Secadores por convección (directos) por lotes

Secadores por conducción

Secadores por conducción (indirectos) continuos

Secadores por conducción (indirectos) por lotes

Secadores por radiación

Selección de secadores

6. Ubicación en el Programa

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUERPO PRINCIPAL

En este punto del curso, podemos decir que el simulador de un secador, es una caja negra, que tiene unas variables de entrada y de salida, tal como se muestra en la Figura 1.1. Igualmente sabemos que dentro del secador se presenta un intercambio de calor y masa, por lo que las variables lógicas de entrada son los flujos de sólido o líquido a secar y de gas de secado, sus temperaturas y contenidos de agua. Se esperarían las mismas variables de salida, flujos, temperaturas y contenidos de agua. Dichas variables de salida, serán calculadas por el simulador, al establecer las dimensiones y condiciones de trabajo o de operación.



Figura 1.1. Diagrama de bloques inicial de un simulador.

Objetivo del Módulo 1

Presentar los términos básicos del secado, el sistema de unidades recomendado para la simulación, y la notación del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, así como explicar la transformación, de unidades coloquiales del secado, a unidades de ingeniería y viceversa. Adicionalmente, explicar la forma de seleccionar secadores industriales para aplicaciones específicas y describir los sistemas de secado industrial del Programa.

Competencias a desarrollar en el Módulo 1

Las competencias son procesos complejos que se configuran en su propio desarrollo; integran en su estructura, conocimientos, habilidades, actitudes, valores, estrategias, que se relacionan y combinan según las condiciones, características y potencialidades de cada sujeto, del contexto y de la actividad específica para la que se requieren, los cuales, al ser movilizados, permiten un desempeño autorregulado, independiente, flexible, responsable y reflexivo, la toma de decisiones, el enfrentamiento a conflictos y la reconstrucción de sus estrategias, para actuar en la solución de tareas y problemas profesionales y de la vida (Montes de Oca y Machado, 2014).

El desarrollo de estas competencias requiere la "complicidad" de la persona y/o equipo a entrenar. No es posible imponer una actitud a una persona que no cree en ella. Por eso, si no existe un compromiso previo para desarrollar una competencia

específica, es necesario trabajar en principio con los modelos mentales y emocionales de la persona o equipo, a fin de desarrollar la conciencia sobre la importancia de la/s competencia/s a entrenar (Buol, 2009).

El participante que aprueba el **Módulo 1. Introducción a los Sistemas de Secado Industrial**, del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, establece una comunicación eficiente y efectiva, entre sus pares, del área de secado, y entre este y personas ajenas a dicha área, así como, entre los datos de entrada ingresados por el usuario y el simulador, y entre el simulador y los datos de salida que visualiza el usuario; igualmente, selecciona el tipo de sistema de secado industrial, requerido para una aplicación específica, y describe sus componentes.

1. Términos básicos

Treybal (2001), define el **Secado**, como la operación unitaria que consiste en la transferencia simultánea de la humedad de un sólido, hacia una corriente de gas no saturado, y del calor del gas hacia el sólido.

Por otro lado, la **humedad** es una medida de concentración, que expresa, la cantidad de agua presente en una sustancia. De esta forma, es incorrecto decir, “humedad trasferida”, ya que la concentración no se transporta de una fase a otra. En este aspecto, se considera un error conceptual o de traducción, lo expresado en el Treybal (2001), en la definición de secado antes mencionada. Lo correcto, es decir, “agua transferida”, ya que el agua, si se transporta de la fase sólida o líquida a la fase gaseosa, durante el secado. Tampoco es correcto, circunscribir el secado, solo a la transferencia de calor por convección, ya que la fuente de calor o energía, requerida para acelerar el transporte del agua, de una fase a otra, puede ser suministrada por radiación, conducción o inclusive microondas y campos dieléctricos.

El **secado**, no debe confundirse con la **deshidratación**, que engloba, varios procesos de separación. Por ejemplo, cuando una mezcla homogénea líquida binaria de agua, y otra sustancia volátil, se somete, a evaporaciones y condensaciones repetidas, hasta obtener la sustancia más volátil (la de menor punto de ebullición), lo más puro que se quiera, esto no es secado, esto es **destilación**. Si comprimimos un material sólido, y producto de esa compresión, se extrae el agua, esto se conoce como **prensado**. Si una sustancia inmiscible en agua, como los aceites, se separa de esta, por diferencia de densidad en un decantador, el proceso se conoce como **decantación**. Si hacemos pasar una mezcla líquida, de agua y una sustancia orgánica, de mayor tamaño molecular, a través de lecho de zeolitas, se produce una separación del agua, conocida como **tamizado molecular**. Para que

un proceso de **deshidratación** sea considerado **secado**, no solo debe haber un aporte de calor o energía, a la mezcla a deshidratar, sino que, además, se debe poner en contacto con una corriente de gas no saturada, es decir, que tenga capacidad de absorber agua en forma de vapor (lo que se considera la verdadera fuerza impulsora), tal que el agua pase del material o mezcla, hacia dicha corriente de gas. La corriente gaseosa, puede ser, aire ambiental, gases de combustión (para prescindir del uso de un intercambiador, cuando el material es inerte a dichos gases), nitrógeno puro o cualquier otro gas inerte, o vapor de agua sobrecalentado (cuando el material se oxida rápidamente, o cuando es inflamable o explosivo).

Cuando las cantidades de agua y sustancia, utilizadas para calcular la humedad, se expresan en unidades de masa, la humedad se conoce como **humedad másica**.

Cuando las cantidades de agua y sustancia, utilizadas para calcular la humedad, se expresan en números de moles, la humedad se conoce como **humedad molar**.

Solo en caso que se mencione lo contrario, para algún modelo en particular, cuando se hable de humedad, será la humedad másica.

La **Humedad en base húmeda (bh)**, se refiere a la cantidad de agua que tiene un sólido o líquido, con respecto a la cantidad total de sólido o líquido. Se conoce también como humedad en base total. Se entiende como la humedad en unidades coloquiales, es decir, las que todo el mundo entiende con facilidad, y se expresa normalmente en términos porcentuales.

La **Humedad en base seca (bs)**, se refiere a la cantidad de agua que tiene un sólido o líquido, con respecto a la cantidad de sólido o líquido sin agua. Se entiende como la humedad en unidades de ingeniería, es decir, que es particularmente útil para los cálculos de ingeniería o de simulación. Su magnitud no se capta con facilidad, como en el caso de las unidades coloquiales. Por ejemplo, 80% de humedad en base húmeda, es más baja que una humedad de 14 en base seca. Esto se explicará, con más detalle, en el **Tema 4. Notación y transformación de unidades**, de este módulo.

La **Humedad absoluta**, se refiere a la cantidad total de vapor de agua que tiene un gas, con respecto a la cantidad de gas sin vapor de agua.

La **Humedad de saturación**, es la cantidad máxima de vapor de agua de agua, que puede estar en el seno de un gas, a unas condiciones de temperatura y presión determinadas. En términos termodinámicos, se define como la humedad de un gas en el que el vapor de agua contenido en él, está en equilibrio con agua líquida a la temperatura y presión del gas, o lo que es lo mismo, la humedad a la cual, la presión

parcial del vapor de agua, en el gas, iguala a la presión de vapor, del agua líquida pura, a la temperatura y presión del gas (McCabe *et al*., 1991).

La **Humedad relativa**, también conocida como saturación relativa, se refiere a la cantidad de vapor de agua que contiene un gas, en relación a la cantidad de agua que es capaz de tener en su seno, si estuviera saturado a las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentra sometido. Se expresa normalmente en términos porcentuales. Su define, en términos termodinámicos, como la relación entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas (Treybal, 2001), lo cual se logra, igualando las cantidades de vapor de agua, con la ley de gases ideales y eliminando términos semejantes del numerador y el denominador (temperatura, constante universal de los gases y el peso molecular), incluyendo el volumen, el cual es el mismo, ya que todo gas, ocupa el volumen del recipiente que lo contiene.

La **Temperatura de rocío**, es la temperatura a la que es preciso enfriar (a humedad constante) una mezcla vapor-gas para que se sature. El punto de rocío de una mezcla gaseosa saturada, es igual a la temperatura del gas. También se suele definir como la temperatura a la cual se forma la primera gota de rocío (McCabe *et al*., 1991).

En la Figura 1.2, se observa una carta psicrométrica, usada para representar las propiedades termodinámicas de las mezclas de aire con vapor de agua, a 1 atm. En teoría, después de haber pasado el Módulo 0, debería deducir que el uso de este tipo de cartas es estrictamente para efectos educativos y para diseño preliminar, pero no para diseño riguroso.

La humedad absoluta, corresponde al eje *y* secundario (el de la derecha), y la temperatura, corresponde al eje *x*. Se aprecian además las curvas de humedad de saturación y la curva de aire saturado. El resto de las propiedades se explicarán de forma analítica en su momento. Se ve indicado un punto, que corresponde a la humedad relativa que tiene un aire con 0,06 de humedad absoluta y 148 grados de temperatura, aproximadamente, la cual corresponde a 30%. Si este gas fuera enfriado a 110,5 grados de temperatura, aproximadamente, el gas pasaría a estar saturado, es decir, con 100% de humedad relativa. De esta forma, para un gas con humedad absoluta de 0,06, su temperatura de rocío es aproximadamente, 110,5 grados. **Hay que resaltar que un gas a estas condiciones no es capaz de secar.**

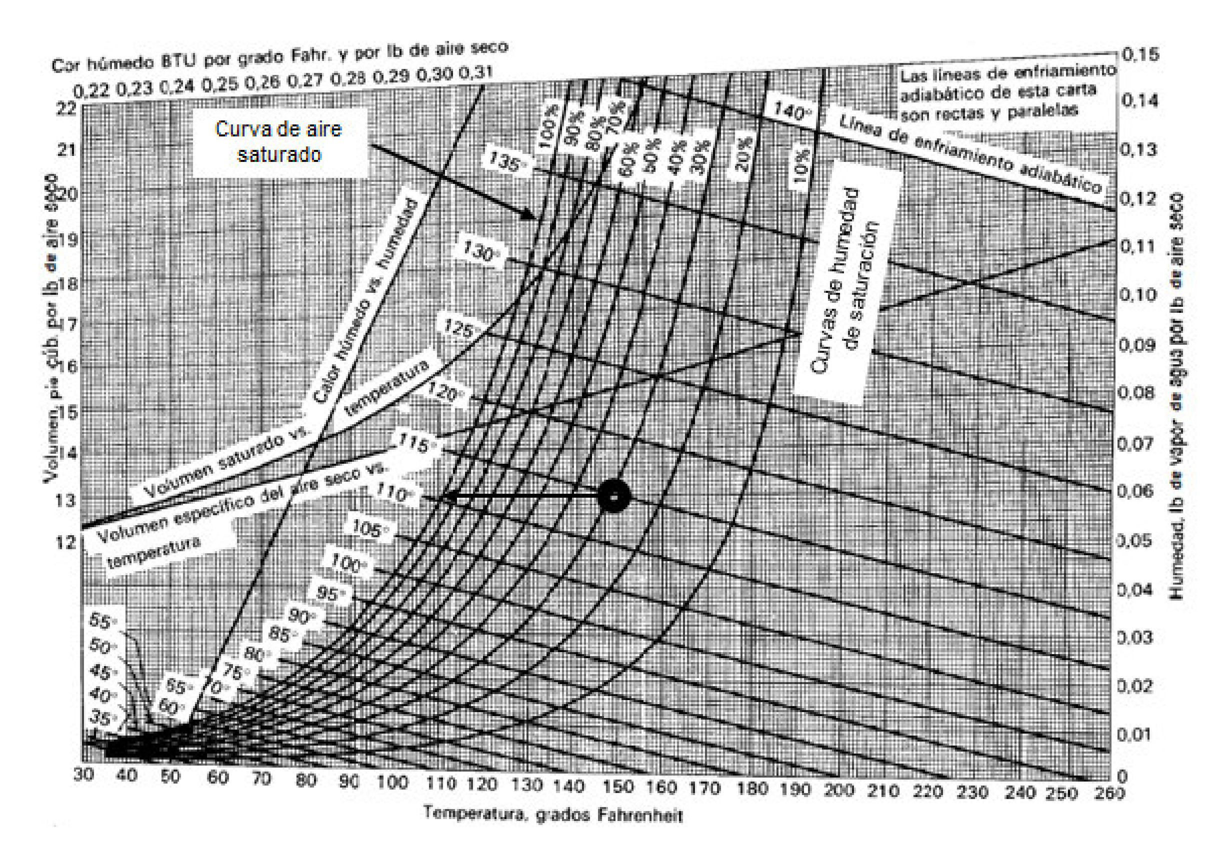


Figura 1.2. Carta psicrométrica, usada para representar las propiedades termodinámicas de las mezclas de aire con agua, a 1 atm. (Adaptado de McCabe *et al*., 1991)

Cuando un sólido, con cierta humedad, entra en contacto con un gas que contiene, una cantidad determinada de vapor de agua expresada como presión parcial, dicho sólido ganará o perderá agua, hasta que el agua contenida en este, ejerza una presión de vapor, igual a la del vapor de agua, en el gas. Una vez que dichas presiones se igualen, el sólido y el gas estarán en equilibrio, y el contenido de humedad del sólido será su **Humedad de equilibrio**, a las condiciones predominantes (McCabe *et al*., 1991; Treybal, 2001). La humedad de equilibrio, depende de las condiciones de presión y temperatura del gas, y del propio sólido, de su composición química, morfología o grado de procesamiento. Ejemplos de la variación de la humedad de equilibrio, con respecto, a la variación de la humedad relativa del aire (o en algunos casos, con respecto, a la actividad de agua*), pueden ser visto, en la Figura 1.3, conocidas como curvas de humedad de equilibrio. La forma de representar estas curvas no es homogénea.

---

* concepto que se explicará con más detalle, en el Módulo 2, así como los fenómenos superficiales involucrados y los modelos de predicción, más utilizados.

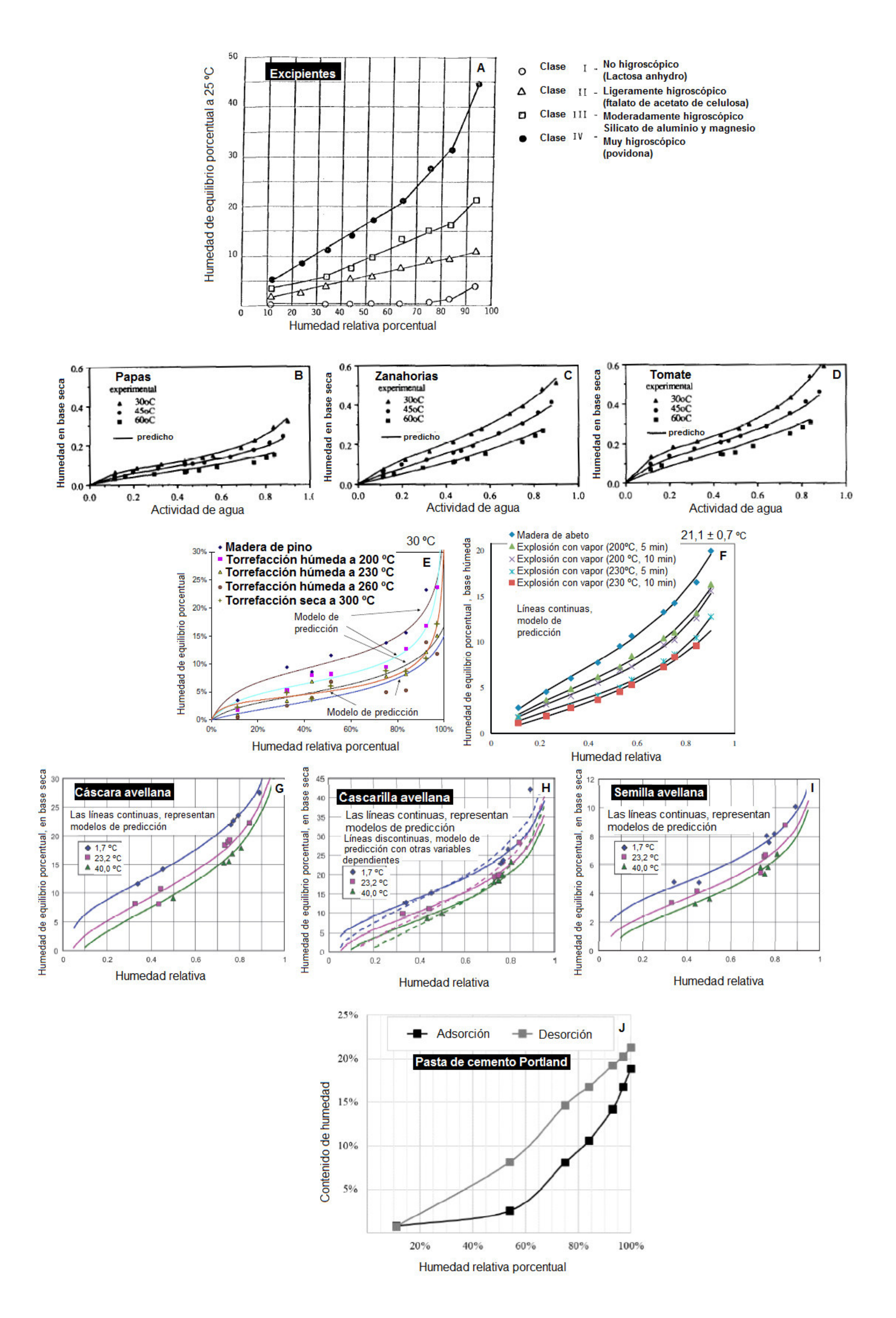


Figura 1.3. Curvas de humedad de equilibrio para distintos materiales, (A) exipientes (Callahan *et al*., 1982); (B) papas, (C) zanahorias y (D) tomates, en rodajas (Kiranoudis *et al*., 1993); (E) madera de pino tratada y no tratada con torrefacción (Acharjee *et al*., 2011); (F) madera de abeto tratada y no tratada con explosión con vapor (Lam *et al*., 2012); (G) cáscara de avellana (H) cascarilla de avellana, y (I) semilla de avellana (Bohnhoff y Bohnhoff, 2019); (J) pasta de cemento Portland (Bednarska y Koniorczyk, 2020).

Callahan *et al*. (1982), presentaron curvas de humedad de equilibrio, a 25 ºC, para 4 excipientes de diferente higroscopicidad (lactosa, ftalato de acetato de celulosa, silicato de aluminio y magnesio y povidona), en términos de humedad relativa porcentual del aire, en función de la humedad de equilibrio porcentual en base seca (Figura 1.3A); Kiranoudis *et al*. (1993), presentaron curvas a 30 ºC, 45 ºC y 60 ºC, para tres vegetales en rodajas, papas, zanahorias y tomates (figuras 1.3B, 1.3C y 1.3D, respectivamente), en términos de actividad de agua, en función de la humedad de equilibrio en base seca; para la madera de pino tratada y no tratada con torrefacción (Figura 1.3E), Acharjee *et al*. (2011), presentaron curvas a 30 ºC, en términos de humedad relativa porcentual en función de la humedad de equilibrio porcentual en base seca; para la madera de abeto tratada y no tratada con explosión con vapor (Figura 1.3F), Lam *et al*. (2012), presentaron curvas a 21,1 ºC ± 0,7 ºC, en términos de la humedad relativa en función de la humedad de equilibrio porcentual en base seca; para cáscara, cascarilla y semilla de avellana (figuras 1.3G, 1.3H y 1.3I, respectivamente), Bohnhoff y Bohnhoff (2019), presentaron curvas a 1,7 ºC, 23,2 ºC y 40,0 ºC, en términos de la humedad relativa en función de la humedad de equilibrio porcentual en base seca. Finalmente, para la pasta de cemento Portland (Figura 1.3J), Bednarska y Koniorczyk (2020), presentaron curvas de absorción y desorción de humedad, en términos de la humedad relativa porcentual, en función de la humedad de equilibrio porcentual en base húmeda (no reportaron temperatura).

Observando las curvas, se puede decir que, a mayor higroscopicidad, los materiales retienen más agua, que los menos higroscópicos. Por ejemplo, la povidona (muy higroscópica), a 90% de humedad relativa, retiene 13 veces más agua, que la lactosa (no higroscópica), a la misma humedad relativa. En cuanto a los vegetales, existe un orden de menor a mayor higroscopicidad, papas > zanahorias > tomates, que puede tener relación con la disminución del contenido de almidón, que sigue ese mismo orden (Roe *et al*., 2013). Los pretratamientos aplicados a la biomasa, conducentes a eliminar barreras, y desordenar la matriz lignocelulósica, para acceder a los componentes que generan biocombustibles (celulosa y hemicelulosa), permiten, una disminución de la higroscopicidad de la biomasa, en la medida en que aumenta su severidad (aumentos en la temperatura, la presión, la concentración de químicos o el tiempo de residencia, del pretratamiento, aumentan la severidad), y dicha disminución (de la hidroscopicidad), refleja el acceso creado hacia la celulosa, más cristalina y menos porosa. El resultado obtenido para la avellana, va en concordancia con lo visto para la biomasa tratada y no tratada, en donde las cubiertas de la semilla de avellana, son más higroscópicas, que la propia semilla, y el retiro de las cubiertas, equivale a un pretratamiento, pero estrictamente físico, siendo las semilla, rica en carbohidratos, no así las cubiertas que contienen principalmente fibra. Cuando el cemento de una humedad determinada, es puesto

en contacto con el ambiente, puede tomar dos rutas, en función si gana o pierde humedad, adsorción o desorción, respectivamente, lo que se conoce como histéresis. Esto se explicará con más detalle, en el **Módulo 2**.

El **Agua Libre**, es la diferencia entre el contenido de agua total del sólido, y el contenido de humedad en el equilibrio (McCabe *et al*., 1991; Treybal, 2001). Es el agua que puede ser eliminada, mediante secado convencional.

La Figura 1.4, muestra la representación gráfica típica del proceso de secado de un sólido, en una curva de razón humedad en el tiempo/humedad inicial (X_t/X_0, ambas en base seca), en función del tiempo (t), desde la razón de la humedad inicial (X_0/X_0 = 1) hasta la razón de la humedad de equilibrio (X_e/X_0).

Esta curva se genera midiendo la masa del material en cortos intervalos de tiempo, mientras dicho material se somete a un proceso de secado en condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Al constatar que la masa no tiene una variación significativa en mediciones sucesivas, se pasa la muestra a una estufa para remover toda el agua que se pueda eliminar por secado. Finalmente, con estas masas se calculan las humedades y se grafica.

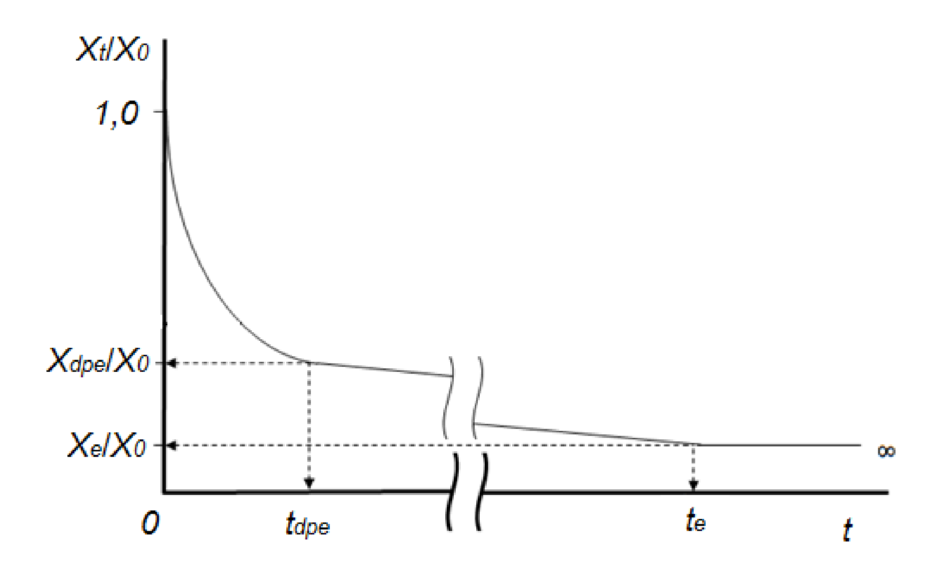


Figura 1.4. Proceso de secado de un sólido, desde la humedad inicial hasta la humedad de equilibrio (Faneite *et al*., 2016).

En principio, se aprecia la disminución monotónica del contenido de humedad del material (desde X_t/X_0=1 hasta X_{dpe}/X_0), seguido de un estado de transición llamado pseudo-equilibrio dinámico (desde X_{dpe}/X_0 hasta X_e/X_0), finalizando, en el estado de equilibrio real (desde X_e/X_0 hasta el infinito). La humedad en la que ocurre el cambio, entre el decrecimiento monotónico de la humedad y el periodo de transición, fue bautizada como **humedad de pseudo-equilibrio dinámico**, por Faneite *et al.*

(2016). El prefijo "pseudo" (falso) proviene de que el pseudo-equilibrio, es un proceso que visto a en un pequeño periodo de tiempo, luce como un equilibrio (la variación de la masa, en el experimento cinético está en el orden de 10^{-3} g), pero en realidad, se puede notar que es un proceso transitorio de cambio de humedad muy lenta en el tiempo. Es dinámico porque se presenta en estudios donde hay circulación de aire, y no en mediciones del equilibrio de la forma tradicional, en donde no se le aporta movimiento al aire. Errónea e históricamente, la humedad de equilibrio, es considerada el límite del periodo de disminución monotónica de la humedad, ya que el modelado tradicional, no toma en cuenta el periodo de transición, lo que crea errores en la simulación del secado, en donde inclusive, se pueden encontrar humedades negativas, en las últimas etapas de secado del sólido (Faneite *et al*., 2016 y 2020).

Considérese una placa de espesor *2a*, con los cuatro bordes sellados, de tal forma que la difusión sólo puede suceder desde y hacia las caras paralelas planas; una sección transversal de ésta se muestra en la Figura 1.5. Supóngase inicialmente que la humedad (bs) a través de la placa X_0, es uniforme, y que la placa, está sumergida en un medio tal que el agua se difundirá hacia afuera de la placa. Sea la concentración en las superficies X_e, constante con el paso del tiempo. Después de un tiempo *t* en donde ocurre la difusión, se creará un perfil de concentración del centro hacia afuera, tal como se ve en la Figura 1.5, cuyo valor promedio es X_t. Si se permite que la difusión continúe indefinidamente, la concentración caerá al valor uniforme X_e, siendo X_0 - X_e, la medida de la cantidad de agua que es posible eliminar, o lo que es lo mismo, el agua libre (Treybal, 2001). La **fracción de agua no eliminada**, denotada en la literatura como M_R o M_r, viene dada por la ecuación 1.

$$M_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \qquad \text{Ecuación 1}$$

La **fracción de agua no eliminada**, es la medida de concentración de agua, más popularmente usada en el secado, para el modelado de las curvas de secado, sin embargo Faneite *et al*. (2016), evidenciaron que si el modelo utilizado para predecir el comportamiento cinético de la desorción de agua, no tiene la capacidad de modelar el periodo de pseudo-equilibrio, el límite real del modelo (mas no del proceso de secado), es la humedad de pseudo-equilibrio dinámico (X_{dpe}), quedando la fracción de agua no eliminada, expresada correctamente para el uso de simuladores, con la ecuación 2.

$$M_R = \frac{X_t - X_{dpe}}{X_0 - X_{dpe}} \qquad \text{Ecuación 2}$$

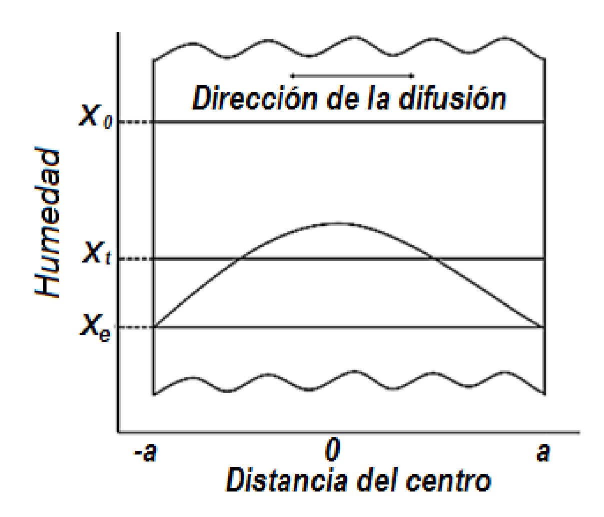


Figura 1.5. Representación gráfica del concepto de la fracción de agua no eliminada (Adaptado del Treybal, 2001).

El **Calor que escapa con el gas**, es el calor requerido para calentar el aire de salida del secador, desde la temperatura ambiente, hasta la temperatura de salida. Se considera una pérdida energética (Mujumdar, 2006).

La **Eficacia† térmica**, se define como la razón porcentual de la energía requerida para vaporizar el agua eliminada en un proceso de secado, en función de la energía usada para calentar el gas de secado. Hasta principio de los años 80, el término se manejaba para comparar desempeños de secadores, en función de distintos parámetros operativos (Masters, 1983), pero no fue hasta mediados de los 80, cuando se operacionalizó en el concepto que se conserva hasta ahora (Cul *et al*., 1985). El concepto a la fecha se mantiene vigente (Sanni *et al*., 2016; Motevali y Chayjan, 2017; Poozesh *et al*., 2018), para comparar el desempeño de distintas condiciones de secado, a pesar de existir una propiedad, popularmente conocida y ampliamente difundida en las investigaciones básicas de la cinética de secado, llamada energía de activación, que en teoría, debería ser la barrera energética real, mínima a vencer, para que cualquier secador consiga su objetivo, sin embargo, lo difuso de este término (Faneite *et al*., 2020), lo hace poco atractivo para los

† La eficiencia, la eficacia y el rendimiento se suelen confundir. La eficacia es la capacidad para producir un efecto deseado o de ir bien para una determinada cosa. En secado se usa la eficacia térmica para comparación de desempeño entre secadores o entre condiciones operativas de un mismo secador, expresada en cantidad de energía para evaporar el agua eliminada, en función de la energía aportada por el calentador. Es adimensional, pero el numerador y el denominador son variables diferentes, a diferencia de la eficiencia que son las mismas variables. Se expresa como una razón o en términos porcentuales. Es un término más orientado al enfoque técnico, de la operación de secado, aunque tiene repercusión directa en lo económico.

investigadores que evalúan desempeño de condiciones de secado, generando de esta forma, una desconexión entre la investigación básica y la aplicada, sin embargo, a falta de modelos apropiados para la simulación, se suele usar para estos fines.

2. Descripción de los sistemas de secado industrial del Programa

El Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales, comprende tres temas, relacionados con tres tipos de secadores específicos, secadores de transporte pneumático, secadores de cinta transportadora y secadores rotatorios. A continuación se describirán los sistemas, que contienen, estos tres tipos de secadores, con una breve explicación sus principios de funcionamiento, subtipos. Se especificará, cuál de los subtipos explicados, serán vistos en detalle en los cursos intermedios y avanzados.

Secador de transporte pneumático

Uno de los sistemas de secado más ampliamente utilizado es el secador flash o también conocido como secador neumático, los cuales, son unidades de secado directo, conocidas también como secadores convectivos. En estos secadores, la corriente de gas, transporta las partículas del solido a través del sistema, y hace contacto directo con este. El tamaño de las partículas a ser secadas usualmente se encuentra en el rango de 10 µm - 500 µm, y las velocidades del gas, alrededor de los 25 m/s (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006). En la Figura 1.6, se muestra un dibujo esquemático del sistema de secado industrial, asociado a un secador de transporte pneumático.

Los sólidos granulares, al fluir libremente, se dispersan en la corriente de gas caliente que fluye con rapidez, con un tiempo de exposición de unos segundos, estos tiempos de secado, tan breves, limitan el método, a los casos en que sólo se tiene humedad superficial, en donde no es importante la difusión interna de la humedad dentro del sólido. Sin embargo, las elevadas superficies de contacto y, los elevados coeficientes convectivos para la transferencia de calor, generan una elevada tasa de evaporación y una elevada capacidad de secado. La característica principal de estos secadores, es que la velocidad del aire supera la del lecho fluidizado, teniendo suficiente fuerza, para acarrear los sólidos, en su seno (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006).

El gas de secado se produce por calentamiento indirecto o directamente, haciendo uso de gases de combustión, aportando la energía necesaria para evaporar el agua, la cual recoge en su seno (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006). La entrada y salida de aire, se regula con los sopladores de entrada y salida, respectivamente, y el sólido

inicialmente en una tolva, entra al secador a través de un alimentador, saliendo una fracción por el ciclón de salida, y otra por el filtro bolsa. El aire antes de entrar al secador, es calentado en el calentador (ver Figura 1.6). En la Figura 1.7, se muestra una fotografía de un secador de transporte pneumático comercial.

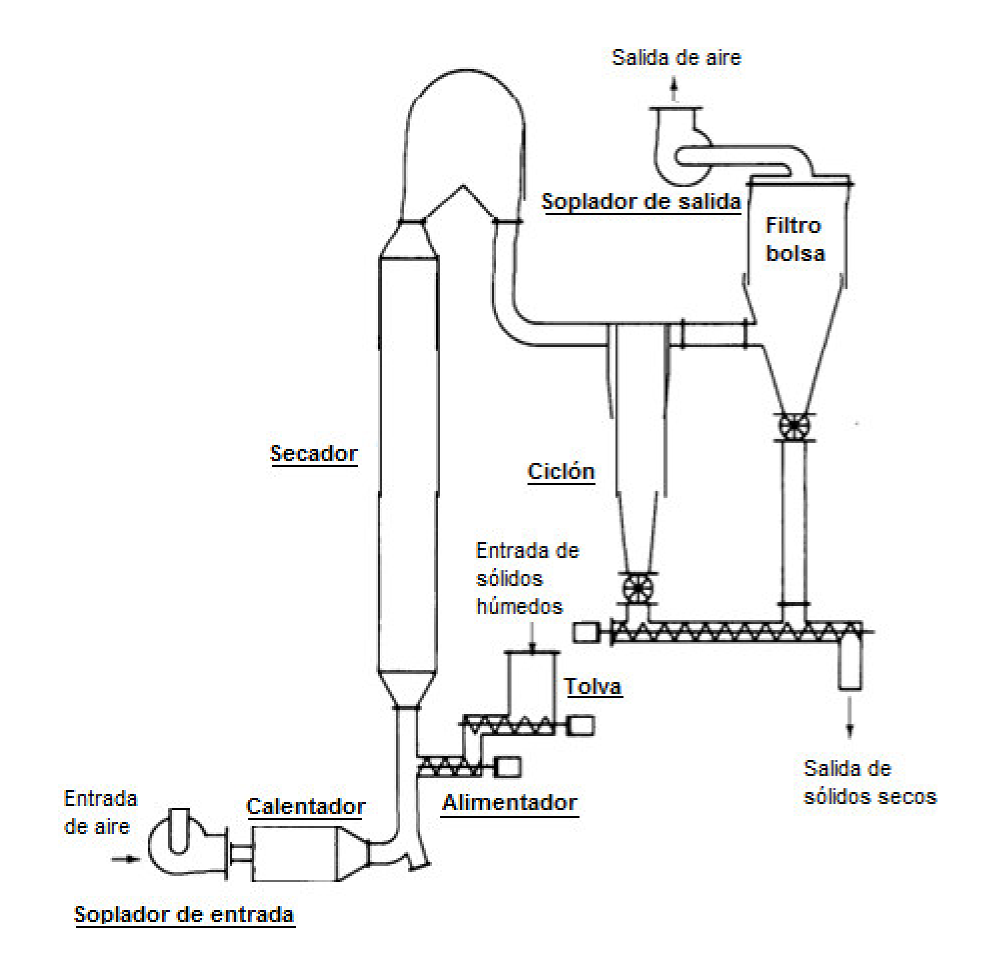


Figura 1.6. Dibujo esquemático de un sistema de secado de transporte pneumático (Adaptado del Treybal, 2001).

Los componentes del sistema de secado de transporte pneumático, antes mencionados, se explican a continuación.

- **Sopladores de entrada y salida**: Son equipos rotatorios diseñados para mover grandes volúmenes de aire o gas a través de conductos, suministrando aire, tanto para el transporte pneumático, como para el secado de material, en el caso del soplador de entrada y para calentamiento indirecto del gas de secado, así como para garantizar la circulación del gas, a través de los distintos componentes del sistema, aguas abajo del secador, para el caso del soplador de salida. El aumento de la presión de descarga no es tan elevado como en los compresores, pero superior a los ventiladores, y

generan vacío en la succión. El de entrada es de tiro forzado y el de salida, de tiro inducido, por la succión de aire frío (más denso) y caliente (menos denso), respectivamente (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006) (ver Figura 1.8A).



Figura 1.7. Fotografía de un secador de transporte pneumático con su batería de ciclones a la salida (Fuente: Jinghua Industry Co., Ltd).

- **Calentador de aire**: Son equipos de transferencia de calor, tipo caldera, en donde la energía requerida para pasar el aire de la temperatura ambiente a la temperatura de secado, es suministrado por la combustión de un combustible. Para algunas aplicaciones, el gas de combustión, puede ser usado directamente, como gas de secado (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006) (ver Figura 1.8B).
- **Secador**: Está compuesto por un tubo por donde circula el sólido arrastrado por el gas. Un aislamiento térmico evita que el calor se disipe al medio ambiente, y, por consiguiente, evita el gasto excesivo de combustible. Debe ser de un material que no se deforme ante la temperatura del gas de secado y se debe tomar en cuenta que el servicio que manejará es un fluido húmedo y abrasivo (Treybal, 2001; Mujumdar, 2006) (ver Figura 1.8C).
- **Alimentador y tolva**: Es una tolva, unida a un transportador tipo tornillo sin fin. Este último consiste en elevadores helicoidales continuos, montados en una barra o tubo que gira por acción de un sistema de transmisión motorizado. Se encuentra enclaustrado, en una artesa, que permite el direccionamiento del sólido en la dirección del eje, cuando este gira. La tolva es un equipo de almacenamiento temporal del sólido húmedo. Su área

transversal superior, disminuye conforme se acerca a la artesa del tornillo sin fin (Perry, 1997) (ver Figura 1.8D).

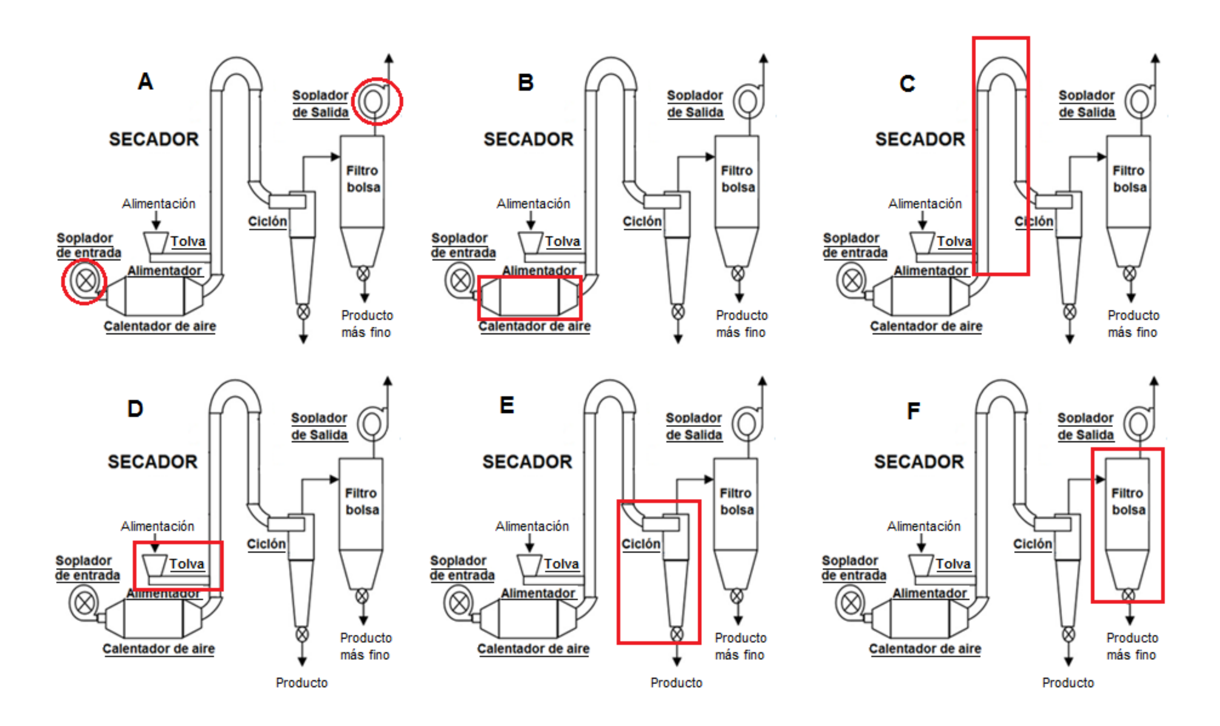


Figura 1.8. Detalle de los componentes del sistema de secado industrial asociado a un secador de transporte pneumático

- **Ciclón**: El tipo de equipo de recolección de polvo más utilizado es el ciclón, en el que el gas cargado de polvo, ingresa de forma tangencial a una cámara cilíndrica o cónica en uno o más puntos, y sale a través de una abertura central. Las partículas de polvo en virtud de su inercia, tenderán a moverse hacia la pared exterior del separador, desde donde la gravedad, los conduce hasta el fondo del equipo (Perry, 1997) (ver Figura 1.8E).
- **Filtro bolsa**: son colectores en los que el polvo se elimina de la corriente de gas, pasando el gas cargado de polvo, a través de una tela de algún tipo de material (por ejemplo, tela tejida, fieltro o membrana porosa). Estos dispositivos son filtros de "superficie", ya que el polvo se acumula en una capa en la superficie del medio filtrante. Durante este período inicial, la deposición de partículas tiene lugar principalmente por intercepción, difusión y gravedad inercial en la línea de flujo. Una vez que se haya establecido completamente la capa de polvo, el tamizado es probablemente el mecanismo de deposición dominante, la penetración suele ser extremadamente baja, excepto durante el ciclo de limpieza del tejido. El diseño del filtro se relaciona principalmente con las opciones de velocidades

de filtración de gas, de caídas de presión y de los ciclos de limpieza de tejidos (Perry, 1997) (ver Figura 1.8F).

Uno de los temas de este **Programa Internacional de Cursos**, es el de estos secadores de transporte pneumático, lo cual incluye, un curso intermedio de fundamentos y principios de funcionamiento, de 3 Módulos de 4 horas de clase cada uno, para una duración de 12 horas, que se puede hacer al culminar este curso introductorio; y un curso avanzado, de simulación rigurosa y diseño, de 20 horas de clases (5 Módulos de 4 horas cada uno), que se inicia al terminar el curso intermedio. Igualmente, las horas que se reconocen en el certificado como capacitación, incluyen, todos los elementos del proceso de enseñanza y aprendizaje y no solo las horas de clase.

El subtipo específico a estudiar será el de los secadores de transporte pneumático con calentamiento indirecto de gas, es decir, se usará aire ambiental caliente y a alta velocidad como gas de secado y de arrastre, simultáneamente.

Secador de cinta transportadora

Son secadores compactos (no incluyen equipos auxiliares), en donde todos sus elementos, vienen empotrados en una sola estructura. Consisten en una banda sinfín móvil con perforaciones regulares, que pasa a través del secador, en la cual, se esparce el material a secar en forma de capa, por medio de un extrusor de rodillos y durante su paso por el secador, se somete a una corriente de gas de secado a flujo cruzado (Figura 1.9). Dicha corriente puede ser en sentido ascendente o descendente o una combinación de ambas (flechas hacia arriba y hacia abajo en la Figura 1.9A). En esta forma, se logra una concentración de humedad más uniforme en todo el lecho, y se evita el excesivo transporte pneumático de sólidos finos.

El gas de secado es la mezcla de una fracción del gas de salida, llamada recirculación y el aire de entrada. Es adecuado para el manejo de sólidos granulares, y en caso de pastas y tortas de filtración, estas pueden ser preformadas en gránulos, lentejas o fideos, para ser secados en este tipo de secadores (Treybal, 2001).

La banda está hecha de platos perforados o alambradas cubiertas en pequeñas secciones para evitar la ruptura debido a la flexión ininterrumpida de la alambrada. El aire caliente se sopla mediante ventiladores a través del sólido; por lo general, en forma ascendente (Figura 1.9B) a través del sólido húmedo, y en forma descendente (Figura 1.9C) después de obtenido el secado inicial. Comúnmente, la mayor parte del gas se recircula y una parte se descarta continuamente en cada posición del ventilador en el secador (Treybal, 2001).

En general, el secador de cinta transportadora es el más adecuado para secar material particulado en el rango de 1 mm a 50 mm de diámetro. El secado en este secador implica forzar el aire a través del lecho del producto; por lo tanto, los materiales laminados o los lodos, no son adecuados para secarlos en esta aplicación.

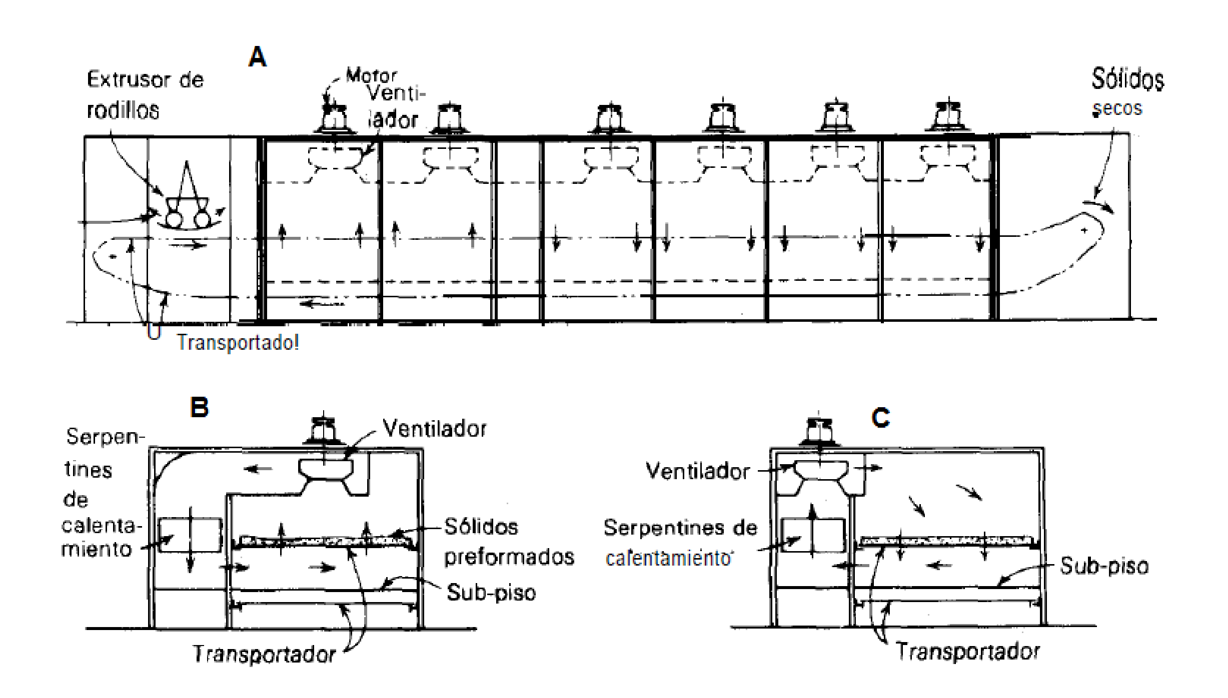


Figura 1.9. Secador de cinta transportadora con extrusor de rodillos (A) Corte longitudinal; (B) Corte transversal flujo ascendente; (C) Corte transversal flujo descendente (Fuente: Treybal, 2001).

Los rangos de humedad típicos van desde un 95 % para algunas frutas que entran al secador, hasta menos del 1 % para algunos cauchos sintéticos en la descarga del secador. Si bien los productos muy ligeros son difíciles de manejar, se pueden secar en un secador de cinta transportadora, si el secador está diseñado adecuadamente para manejar dichos productos. Por ejemplo, establecer que todo el aire fluya hacia abajo a través de los lechos, presupondría la contención de productos livianos en la plataforma del transportador. Finalmente, los tiempos típicos de retención son de 5 min a 240 min. Los tiempos de secado significativamente más largos que esto, generalmente resultan en un secador de cinta tan grande, que el precio de compra es difícil de justificar (Mujumdar, 2006).

Configuraciones de los secadores de cinta transportadora

<u>Secadores de cinta transportadora de paso simple/una etapa simple de secado</u>

La disposición más simple del secador de cinta transportadora, es el de una sola cinta, para llevar el material a secar a través del secador, el cual, se distribuye en dicha cinta en el extremo de alimentación, en forma de lecho, para iniciar su recorrido. El aire es forzado a través de dicho lecho por los ventiladores, que por su diseño compacto, se montan en el gabinete del secador. La dirección del flujo de aire a través del recorrido de la cinta, tal como se dijo anteriormente, a menudo se alterna de flujo ascendente a flujo descendente, para minimizar las variaciones de humedad a través del lecho. La Figura 1.10, muestra una fotografía de un secador industrial de este tipo.



Figura 1.10. Fotografía de un secador típico de cinta transportadora de un paso (Mujumdar, 2006).

La Figura 1.11, muestra una sección transversal de un secador de paso simple típico, con un arreglo de un solo *plenum* de flujo de aire. Los *plena* son las cámaras ubicadas debajo o encima del lecho, en función de la dirección del gas de secado, hacia arriba, o hacia abajo, respectivamente, en donde el aire de procesos (de

secado), se canaliza sobre el material a secar. En algunas configuraciones, hay dos *plena* en lugar de un solo *plenum*, para contar con una mayor flexibilidad en términos de la dirección del flujo de aire (Mujumdar, 2006).

Muchos productos, como los alimentos secos empacados, deben enfriarse antes de dicho empaquetado, lo que implica, agregar una sección de enfriamiento al final del secador. Si el enfriamiento a una temperatura superior a la ambiental es suficiente, el aire ambiente puede ser forzado a través del lecho para enfriar el producto. Si se requiere un enfriamiento a una temperatura inferior a la ambiental (por ejemplo, para establecer un recubrimiento, por debajo de su temperatura de transición vítrea[‡]), se utiliza aire frío como medio de enfriamiento.

La disposición de un solo paso, ofrece una serie de ventajas. Normalmente, el secador se separa en zonas independientes, que tienen su propia fuente de calor y ventiladores de circulación. La temperatura del aire y la velocidad del aire se pueden controlar a medida que el producto avanza a través del secador. Otra ventaja de esta disposición, es la capacidad de devolver la cinta transportadora al secador, lo que permite un fácil acceso a la limpieza de ésta, por medio de cepillos inferiores (ver Figura 1.12).

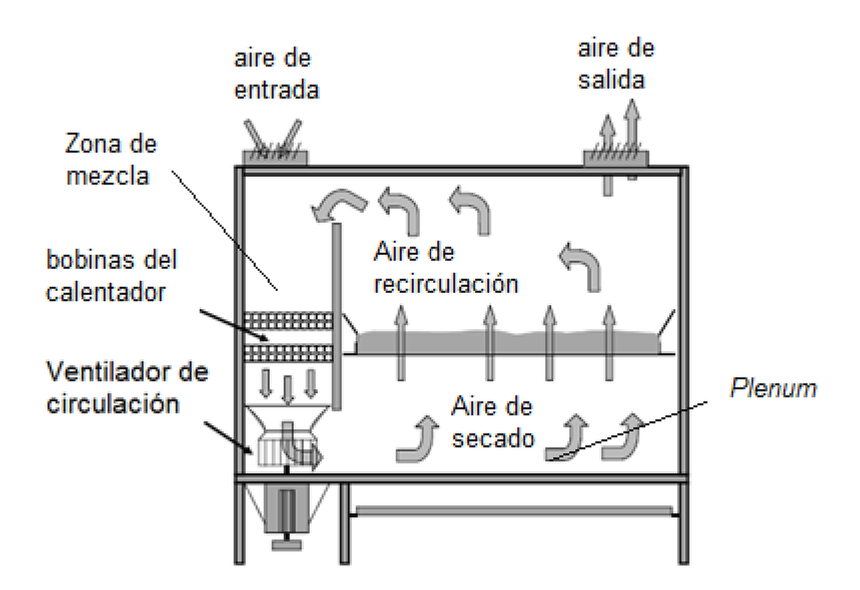


Figura 1.11. Sección transversal típica de un secador de un solo paso, de paso único (Adaptado de Mujumdar, 2006).

El secador de cinta de un solo paso, se adapta mejor a los productos que forman aglomerados o se pegan al transportador. Esta disposición también es adecuada para productos frágiles, ya que el producto no se transfiere de una cinta a otra a

[‡] Este fenómeno, es explicado en el Módulo 2.

medida que avanza a través del secador. La desventaja de la configuración de un solo paso, es que se debe usar la misma altura de lecho durante todo el proceso de secado. Algunos ejemplos de productos que a menudo se secan en secadoras de paso único o simple incluyen, aperitivos extrudidos y directamente expandidos (no recubiertos)[§], refrigerios horneados (para la eliminación final de la humedad después del horneado), nueces, carbón, algunos cauchos sintéticos, polímeros súper-absorbentes, etc. (Mujumdar, 2006).

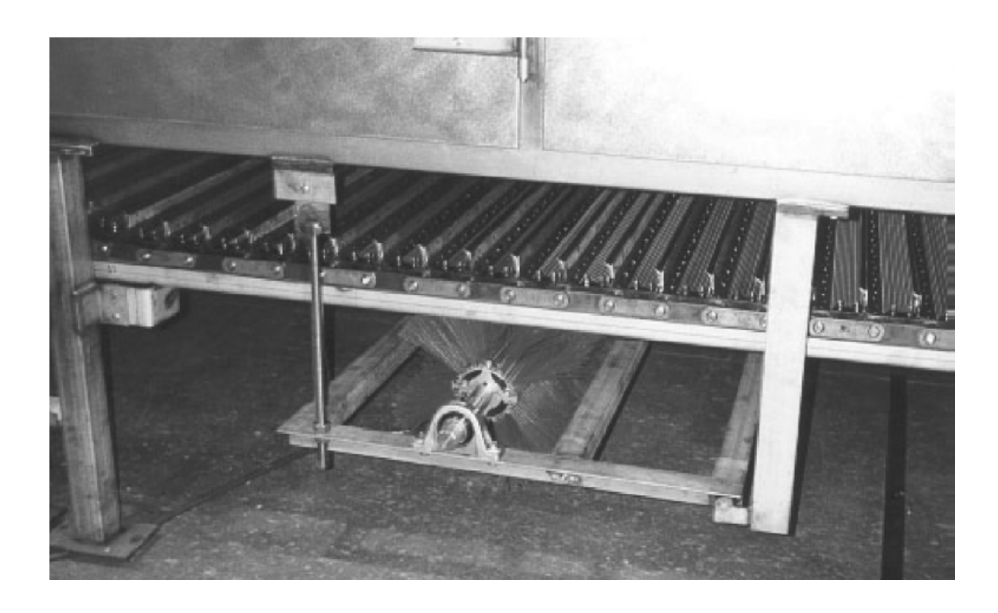


Figura 1.12. Cepillos típicos para limpieza continua de cintas (Mujumdar, 2006).

<u>Secadores de cinta transportadora de paso único de múltiples etapas</u>

La configuración del secador de paso único de múltiples etapas supera la desventaja de la configuración de paso simple/una etapa simple de secado, en términos de profundidad del lecho. La Figura 1.13 muestra dibujo esquemático, de un sistema de secado de paso único de tres etapas. Muchos productos pueden apilarse[**] mucho más profundamente después de haberse secado parcialmente, que cuando ingresan inicialmente en la secadora. La configuración del secador de múltiples etapas le permite al operador hacer funcionar los distintos lechos del transportador, a diferentes velocidades de cinta.

Al ejecutar cada etapa más lento que la etapa anterior, se puede aumentar la altura del lecho a medida que el producto avanza a través del secador. Esto significa que se puede lograr un tiempo de retención del producto, en un secador más pequeño,

---

[§] Cereales inflados, crujientes y crocantes.

[**] Proceso de conformar el lecho en la entrada de la alimetación.

en comparación con una configuración de paso simple/una etapa simple de secado. La rotación del producto de una etapa a otra ofrece el beneficio adicional del mezclado, que permite una mayor homogeneidad de la humedad en la entrada del paso siguiente, así mismo, permite dividir el producto en grupos de interés o disgregar productos que tienden a agruparse, durante su secado.

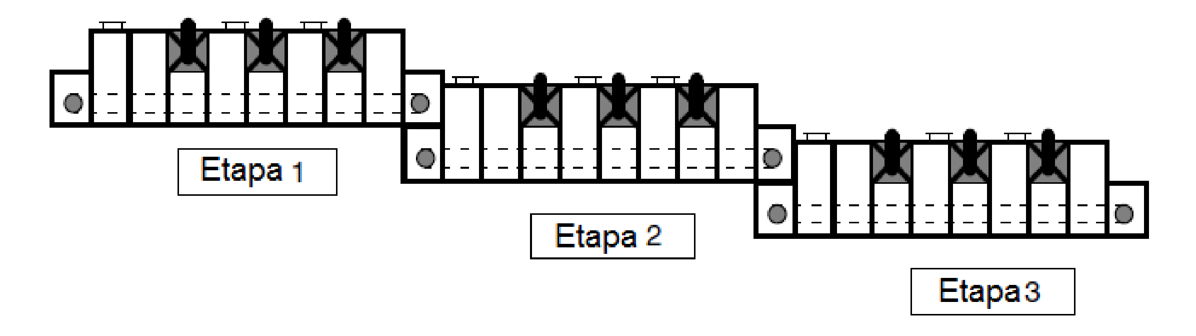


Figura 1.13. Secador de paso simple de tres etapas (Adaptado de Mujumdar, 2006).

La configuración de secador de un solo paso/etapas múltiples, es la configuración más versátil disponible. La temperatura del aire y la velocidad del aire a través del lecho del producto no solo pueden controlarse a medida que el producto avanza a través del secador, sino que también se puede controlar la profundidad del lecho. El único inconveniente de esta disposición es el mayor costo y el requisito de una mayor superficie y la necesidad de más de un piso.

Algunos ejemplos de productos que normalmente se secan en secadoras de paso único/múltiples etapas son: papas fritas, cereales recubiertos, nueces, frutas y verduras, algunos cauchos sintéticos, entre otros (Mujumdar, 2006).

Secadores de cinta transportadora de pasos múltiples

El secador de paso múltiple ofrece muchos de los mismos beneficios que el secador de paso único/múltiples etapas, pero en un tamaño mucho menor. En esta disposición, los lechos del transportador están dispuestos uno encima del otro, corriendo en direcciones opuestas. La Figura 1.14 muestra un secador de tres etapas múltiples. El producto ingresa al secador en la cinta superior y cae en cascada hacia las cintas inferiores. Dos o tres pases son típicos, pero no es raro tener más de tres pases en estos secadores.

Aunque el secador de paso múltiple ofrece la misma flexibilidad que el secador de etapas múltiples, en términos de control de la altura del lecho, se vuelve difícil dividir el secador de manera que la temperatura del aire y el flujo de aire puedan controlarse a medida que el producto avanza a través del secador. Tal zonificación

es posible; sin embargo, se requieren disposiciones complejas de flujo de aire en los *plena* y áreas de fuente de calor.



Figura 1.14. Secador de tres pasos con calentadores a gas (Mujumdar, 2006).

Esta disposición también limita el acceso a las cintas para la limpieza, en comparación con la disposición de un solo paso/múltiples etapas. A pesar de estos inconvenientes, el secador de paso múltiple es la disposición de secador de cinta transportadora más popular en muchas industrias. El costo relativamente bajo y el tamaño pequeño de esta disposición del secador y la capacidad de variar las alturas del lecho, hacen que este sea el secador ideal para muchos procesos. Algunos ejemplos de productos típicamente secados en secadores de paso múltiple son alimentos extruidos y cereales, algunos cereales recubiertos y pastas (Mujumdar, 2006).

Al igual que para el tema de secadores de transporte pneumático, el tema de secadores de cinta transportadora, está contemplado en este **Programa Internacional de Cursos**, para profundizar con un curso intermedio de fundamentos y principios de funcionamiento, de 3 Módulos de 4 horas de clase cada uno, para una duración de 12 horas, que se puede hacer al culminar este curso introductorio; y un curso avanzado, de simulación rigurosa y diseño, de 20 horas de clases (5 Módulos de 4 horas cada uno), que se inicia al terminar el curso intermedio. Las horas que se reconocen en el certificado como capacitación, incluyen todos los elementos del proceso de enseñanza y aprendizaje, y no solo las horas de clase.

El subtipo específico a simular en el Curso Avanzado, será el de los secadores de paso simple/una etapa simple de secado, con una sola dirección de flujo de aire y con una sola temperatura de gas de secado, tal como se vio en la demostración al final de la clase del Módulo 0.

Secadores rotatorios

Forman un grupo muy importante de secadores, y son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre, que pueden arrojarse sin temor de romperse. La Figura 1.15, muestra un esquema de un sistema de secado de secador rotatorio a co-corriente. De ordinario, se utiliza un soplador de extracción para succionar el gas a través del secador, porque así se obtiene un control más completo del flujo de gas. Se puede interponer un recolector de polvo tipo de ciclón, un filtro bolsa o un filtro de lavado, entre el soplador de salida y la salida de gases del secador, o combinaciones de éstos. También puede ponerse un soplador de empuje en la entrada del gas, para mantener una presión cercana a la atmosférica en el secador; éste previene la entrada de aire frío por algún resquicio, entre el calentador de aire y la entrada del secador, o por el lado de la entrada del sólido. Si la presión está bien balanceada, las fugas hacia el exterior también pueden reducirse al mínimo (Treybal, 2001).

Los equipos asociados al secador rotatorio, dentro del sistema típico de secado que usa este tipo de secadores (soplador de entrada, calentador de aire, tolva y alimentador, ciclón, filtro bolsa y soplador de salida), que se muestran en la Figura 1.15, ya fueron explicados en el sistema de secado de secador de transporte pneumático. La diferencia principal en estos dos sistemas es que la salida principal de producto, para el secador rotatorio, está a la salida de éste, siendo el ciclón un elemento para retener una fracción de las partículas, de tamaños muy pequeños, también llamados finos, mientras que en el sistema de secado con transporte pneumático, el producto principal, sale por el ciclón.

Los secadores rotatorios, son tubos ligeramente inclinados o cilindros, con aletas longitudinales internas que giran, propiciando con dicho giro y con la inclinación, la circulación del material sólido a través de él. Su principio de funcionamiento, es el de conformar, una cortina de material, la cual es atravesada, por una corriente de gas, que se lleva el agua vaporizada de dicho material en su seno. Dicha cortina, permite aumentar el área de transferencia de masa, y se forma por la acción de elevadores longitudinales, que recogen el material de la parte inferior y van soltándolo, mientras suben, debido al movimiento giratorio.

Una representación de dicho proceso, puede ser vista, en la Figura 1.16. La transferencia de calor hacia el sólido, puede darse, a través de las paredes o arreglos de tuberías longitudinales o, a través del propio gas.

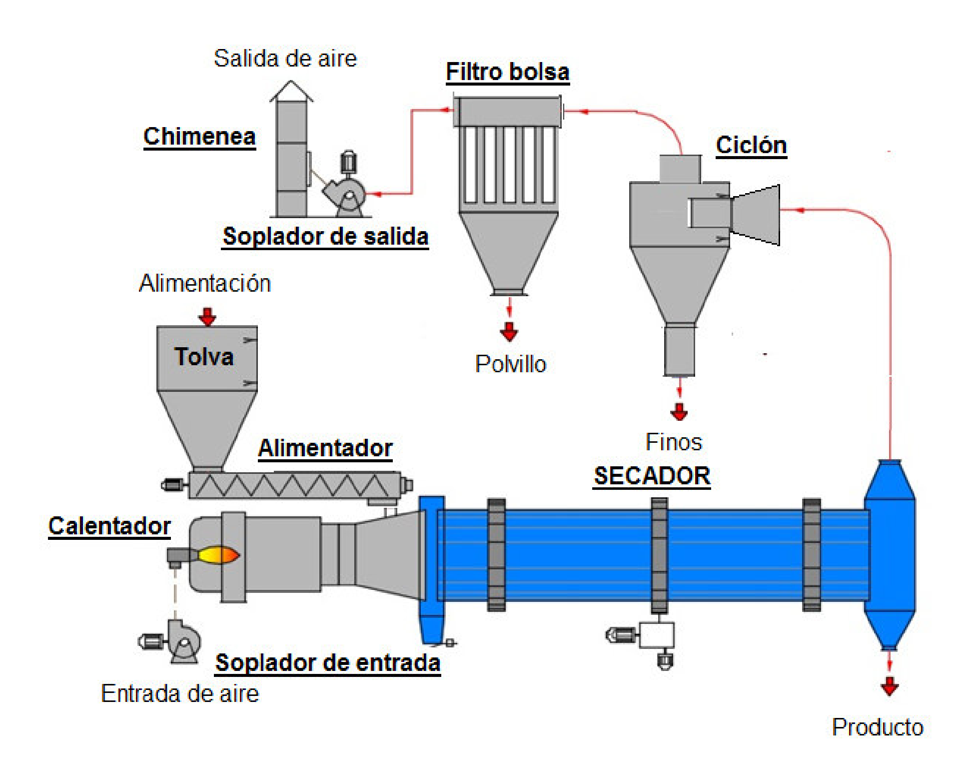


Figura 1.15. Esquema de un sistema de secador rotatorio a cocorriente (Adaptado de GYP MAK)



Figura 1.16. Detalle de la cortina de producto, que crean los elevadores, con el movimiento del secador (Adaptado de FY MACHINERY).

En el extremo de alimentación del sólido, unos cuantos elevadores rectos helicoidales continuos, ayudan a impartir el movimiento inicial del sólido hacia adelante, antes de que este llegue a los elevadores principales. El sólido no debe ser pegajoso ni chicloso, puesto que podría pegarse a las paredes del secador o tendería a apelotonarse, sin embargo, el uso de los elevadores rectos helicoidales continuos, permiten un presecado de aquellos sólidos que presenten levemente esta condición. En estos casos, también es posible la recirculación de una parte del producto seco hacia la alimentación (Treybal, 2001).

El movimiento de partículas en los secadores rotativos es uno de los mayores desafíos la simulación rigurosa. Hosseinabadi *et al*., 2014b, visualizan, el transporte de sólidos en un secador rotatorio, como un fluido que pasa a través de una serie de mezcladores interactivos (celdas), y que se pueden representar como rebanadas cilíndricas del secador. El volumen de sólidos en cada celda se divide en dos fases: una zona activa (fase aérea), que contribuye al transporte axial de los sólidos a lo largo del secador (cortina de sólidos, de la Figura 1.16), y una zona muerta (fase densa), donde los sólidos no se intercambian con celdas vecinas, pero solo con la parte activa correspondiente de la celda (sólido amontonado en el fondo y en las paredes del secador, soportado por los elevadores, en la Figura 1.16). Al pasar por el secador rotatorio, una parte de los sólidos se retrasa varias veces al fluir hacia las zonas muertas, lo que conduce a la cola extendida de la curva de distribución del tiempo de retención.

Según la forma como se transfiere calor al sólido, los secadores rotatorios pueden ser de 3 tipos de secadores: (1) los secadores de calor directo, (2) los de calor indirecto y (3) los mixtos, directo-indirecto. Según como sea, la dirección relativa del flujo entre el gas de secado y el sólido, los secadores directos pueden ser: (1) a co-corriente o (2) en contracorriente. Y según el número de pasos del sólido a lo largo de la longitud del secador, pueden haber: (1) secadores de paso simple o (2) de tres pasos. Según de donde se parta, de cualquier de estas tres clasificaciones, las subclasificaciones o subtipos, salen de las otras dos.

Los secadores rotativos de contacto directo se pueden dividir en otras tres categorías: (1) sistemas de calentamiento indirecto del aire, en donde el aire fresco, entra en contacto con una superficie caliente y solo se transfiere calor, generando aire caliente, como gas de secado; (2) sistemas de calentamiento directo del aire, en donde se usan directamente los gases de combustión, más aire pobre en oxígeno, como gas de secado; (3) Sistemas de circuito cerrado, en donde el fluido de calentamiento, puede ser vapor de agua o vapor sobrecalentado en lugar de gases de secado. El vapor o vapor sobrecalentado entra en contacto con el sólido

y pierde algo de su calor sensible para proporcionar el calor latente de vaporización. (Hosseinabadi *et al*., 2014a).

Para materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc., se pueden utilizar gases de combustión como gas de secado. Para sustancias que no pueden calentarse excesivamente, como ciertos productos químicos cristalinos, como sulfato de amonio y azúcar de caña, se puede utilizar aire caliente. Si se utilizan gases de combustión, las espirales de calentamiento se reemplazan por una caldera que queme gas, aceite o carbón (Treybal, 2001).

En la tercera categoría, antes mencionada, hay dos posibilidades diferentes: (3.1) Si la temperatura de bulbo húmedo es claramente inferior a 100 ºC, entonces el secado se desarrolla en una atmósfera mixta de aire y vapor, y el proceso se denomina secado a alta temperatura; (3.2) Si la temperatura de bulbo húmedo permanece en 100 ºC (o en el punto de ebullición del agua), entonces el secado se lleva a cabo en una atmósfera pura de vapor y el proceso se denomina secado con vapor sobrecalentado (Hosseinabadi *et al*., 2014a).

El vapor de agua que sale del sólido es calentado por el vapor o vapor sobrecalentado, por lo que el resultado neto es una gran cantidad de vapor a una temperatura más baja que el vapor que ingresa a la secadora. El exceso de vapor se elimina y el resto se recalienta mediante un intercambiador de calor y se recicla de nuevo al secador. Los sistemas de circuito cerrado reducen las emisiones de las instalaciones de secado industrial para cumplir con las normas ambientales sin requerir ningún sistema adicional de control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Debido al bajo consumo de energía y al alto potencial de recuperación de energía, estos tipos de secadores son mucho más eficientes que los sistemas convencionales. Otros beneficios sobresalientes de estos sistemas, es que operan, en una ausencia casi total de olores, una mayor seguridad debido al menor riesgo de incendios y explosiones y un secado suave para una calidad óptima del producto (Hosseinabadi *et al*., 2014a).

Secadores rotatorios de contacto directo, de paso simple

Los secadores rotatorios de paso simple, consisten, en una carcasa cilíndrica que gira sobre cojinetes, usualmente, con una ligera inclinación a la horizontal (figuras 1.17A y B). La alimentación húmeda se introduce en el extremo superior del secador, avanzando a través de él, en virtud de la rotación y el efecto combinado de los elevadores (Figura 1.17C) y la pendiente de la carcasa, el producto secado, es retirado en el extremo inferior. La dirección del flujo de gas a través del cilindro

con respecto a los sólidos está dictada principalmente por las propiedades del material procesado.

El flujo a co-corriente (Figura 1.17A) se utiliza para materiales sensibles al calor, donde pudieran incluso usarse temperaturas altas de entrada de gas, debido a su rápido enfriamiento durante la evaporación inicial de la humedad superficial, mientras que para otros materiales es deseable el flujo a contracorriente (Figura 1.17B) para aprovechar la mayor eficacia térmica que puede alcanzarse en este modo. En el primer caso, el flujo de gas aumenta la velocidad de flujo de sólidos, mientras que en el segundo caso lo demora (Mujumdar, 2006).

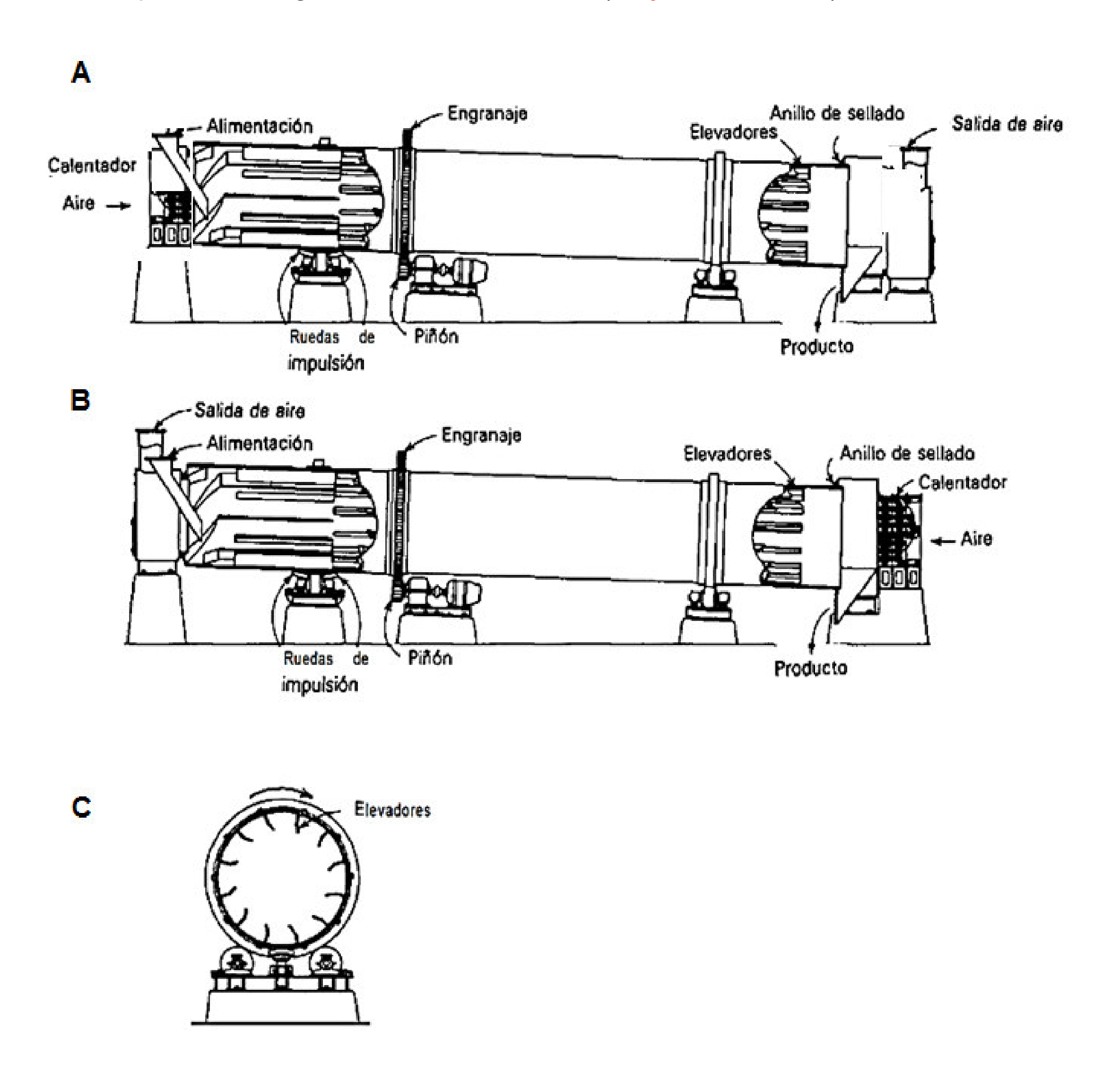


Figura 1.17. Secador rotatorio directo, de aire caliente, A. a contracorriente; B. a cocorriente; C. corte transversal (Adaptado del Treybal, 2001).

El efecto de rebote de las partículas, al caer del elevador y golpear el material presente en el fondo, puede acelerar su avance o retardarlo, y constituye uno de los fenómenos de transporte del sólido, dentro del secador, más difícil de modelar para su uso en las simulaciones, sin embargo, no es un factor de error importante (Barrueta *et al*., 2014; Chourio *et al*., 2014; Hernández *et al*., 2014; Pacheco *et al*., 2014).

Secadores rotatorios de contacto directo a cocorriente, de un paso

Los sólidos que no deben calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos (como yeso, piritas de hierro, y materiales orgánicos como la turba y la alfalfa), deben secarse en un secador con flujo a corriente paralela o cocorriente. En este caso, el gas de secado y el sólido, entran por el mismo extremo del secador, tal como se aprecia en la Figura 1.17A. El flujo de gas, en este caso, contribuye al avance de las partículas de sólido, en su tránsito, a través del secador (Treybal, 2001).

Secadores rotatorios de contacto directo a contracorriente, de un paso

En la Figura 1.17B se muestra un dibujo esquemático de estos secadores de contacto directo a contracorriente. El sólido a secar se introduce continuamente en uno de los extremos del cilindro giratorio, como se muestra, mientras que el gas de secado (aire caliente), ingresa a dicho cilindro, por el otro extremo (Treybal, 2001). Esta configuración, retarda el avance del sólido dentro del secador. Un corte transversal del secador, es mostrado en la Figura 1.17C, donde se aprecian los elevadores, en este caso, continuos y no rectos.

Una fotografía de un secador rotatorio industrial, de un paso, puede ser visto en la Figura 1.18. Igualmente, un ejemplo del interior de un secador rotatorio de un paso, con el detalle de sus elevadores, puede ser visto en la fotografía de la Figura 1.19.

El secado de 45,36 g/h *Lemna obscura*, de 94 % de humedad (bh) y 24 ºC, a cocorriente, en secador rotatorio piloto Bench Scale Equipment, modelo I-34278 (Dayton, Ohio), de 50 cm de longitud y 10 cm de diámetro interno, de un paso, con calentamiento directo con 3,32 kg/h aire caliente, a 120 ºC, con 0,56º de inclinación y 3 rpm, genera hojuelas de lemna de 37,39 % de humedad (bh) y 43 ºC, lo que representa una capacidad de evaporación de agua de 34,87 g/h. El consumo de energía por kilogramos de agua evaporada, para este caso, es de 7442,48 kJ/kg (Faneite *et al*., 2013).



Figura 1.18. Fotografía de un secador rotatorio comercial de un paso (Fuente: FEECO International).

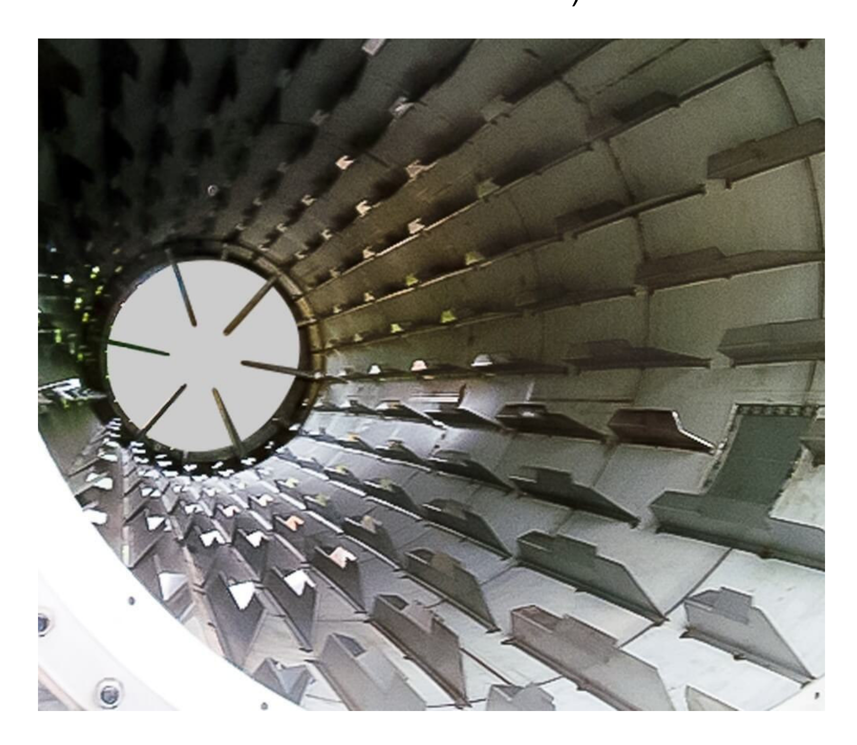


Figura 1.19. Detalle de elevadores discontinuos de un secador rotatorio comercial de un paso (Fuente: Rendertech).

Secadores rotatorios de contacto directo a cocorriente, de tres pasos

Los secadores rotativos de contacto directo de triple paso son el tipo de secadores más ampliamente utilizados, para el secado de partículas de madera en las

industrias de producción de tableros de material compuesto, según Hosseinabadi *et al*. (2014a). El secador rotatorio de tres pasos, tiene una eficiencia[††] de secado 1,5 veces mayor que la del secador rotativo de un paso, y se registró como patente en EE.UU., por primera vez, en 1984 (U.S. Patent No. 8,601,711 B2, 2013), para una configuración de transferencia de calor indirecto. En estos secadores, el hecho de que el sólido, cambie 3 veces de dirección, hace que no sea posible, que una inclinación del secador, contribuya con el movimiento interno de partículas, y solo depende del arrastre que proporciona el aire, y/o del diseño interno de los elevadores y deflectores (U.S. Patent No. 4,477,984, 1984; Hosseinabadi *et al*., 2014b).

En la Figura 1.20, se aprecian, dos configuraciones posibles para un secador rotatorio de calentamiento directo de tres pasos: (1) Flujo de sólido desde el exterior del tambor, hasta el interior (Figura 1.20A); y (2) Flujo de sólido desde el interior del tambor, hasta el exterior (Figura 1.20B). Para cualquiera de los casos, el sólido ingresa al primer paso, dentro del secador, acompañado del gas de secado, avanzando hasta el final, en donde cae en el segundo paso, o paso intermedio. El sólido avanza por el paso intermedio, hasta su final, en donde cae, en el tercer paso, y una vez que lo recorre completamente, sale finalmente del secador.

Además de la eficiencia superior de este secador con respecto a los de un paso, su diseño es compacto y permite el ahorro de espacio, tal como se muestra en el dibujo 3D (Figura 1.21), elaborado mediante Diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), de un equipo industrial. Arinze *et al*. (2003), reportaron resultados operativos para un secador típico de contacto directo de tres pasos (como el de la Figura 1.21), con capacidad instalada de 16 t/h, con longitud de 36 m, y tambores internos de 1 m, 1,75 m y 2,5 m de diámetro, respectivamente; para alfalfa, con una humedad inicial, de entre 72 % y 75 % en base húmeda (bh). Con un caudal de aire de secado, de alrededor de 1000 m^3/min, con temperatura de entre 500 ºC y 900 ºC, y una velocidad de rotación, de entre 8 rpm y 10 rpm, se generó, una capacidad de evaporación de agua de entre 8 t/h y 9 t/h, un producto de entre 8% y 12% de humedad (bh), y una temperatura de salida del gas, de entre 110 ºC y 125 ºC.

[††] La eficiencia, por otro lado, es la capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función, y en el diseño de equipos, se usa para dimensionar equipos, cuando el modelo de diseño, tiene limitaciones para llegar hasta el valor real que se requiere para una aplicación determinada. Se usa para modelos de caja blanca, sumamente simplificados en su fenomenología, y se genera en pruebas piloto a diferentes escalas. La dimensión generada con dicho modelo se conoce como dimensión ideal, y luego de usar la eficiencia, como dimensión real. Se expresa en términos porcentuales. En este Programa de Cursos, se menciona en cuanto a lo eficiente del sistema internacional en relación con otros sistemas, para facilitar los cálculos dentro del simulador y para describir que tan fiel es un modelo para predecir el comportamiento de una variable dependiente.

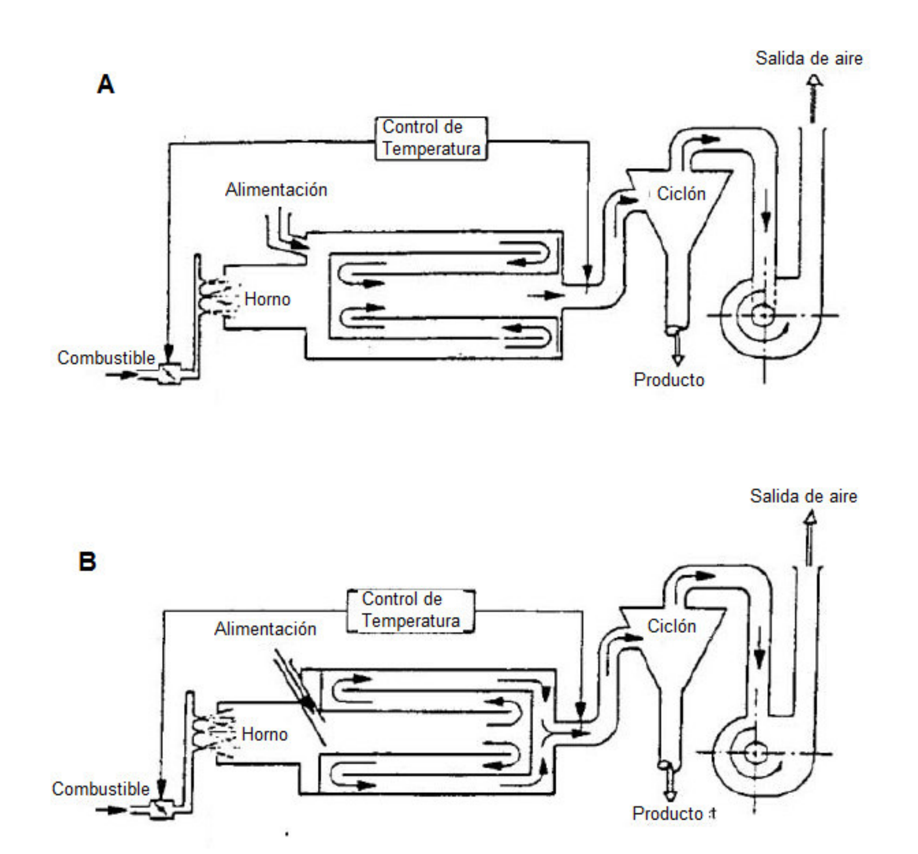


Figura 1.20. Dos configuraciones de secadores rotatorios directos de tres pasos, A. Flujo de sólido desde el exterior del tambor, hasta el interior; B. Flujo de sólido desde el interior del tambor, hasta el exterior (Adaptado de Arinzen *et al*., 2003).



Figura 1.21. Dibujo mediante CAD (Diseño asistido por computadora, por sus siglas en inglés), de un secador rotatorio de tres pasos (Fuente: ALPU)

Los requerimientos energéticos, para el secador de tres pasos de Arinze *et al*. (2003), en términos de consumo volumétrico de gas o propano por tonelada de producto seco, fue de 200 m^3/t a 300 m^3/t, o en términos de energía suministrada por kilogramo de agua evaporada, de 3250 kJ/kg a 4875 kJ/kg. Comparado con el ejemplo anterior de Faneite *et al*. (2013), para un secador de un paso, demuestra la mejor eficacia de estos equipos.

Secadores rotatorios de contacto indirecto

Secadores rotatorios de calor indirecto, con flujo a contracorriente, de un paso

Trabajan con los mismos principios de los secadores rotatorios directos de un paso, pero el gas caliente, no entra en contacto con el sólido. Para solidos como pigmentos blancos y similares, que pueden calentarse a temperaturas elevadas pero que nunca deben entrar en contacto con el gas, puede utilizarse el secador indirecto que se muestra en forma esquemática en la Figura 1.22A. Como una construcción alternativa, el secador, puede encerrarse en una estructura de ladrillo y rodearse completamente con los gases calientes de combustible. El flujo de aire en un secador de este tipo debe ser mínimo, puesto que el calor se proporciona por conducción a través de la estructura o tubería central; además, de esta manera, pueden manejarse los sólidos muy finamente divididos que tienden a formar polvo (Treybal, 2001).

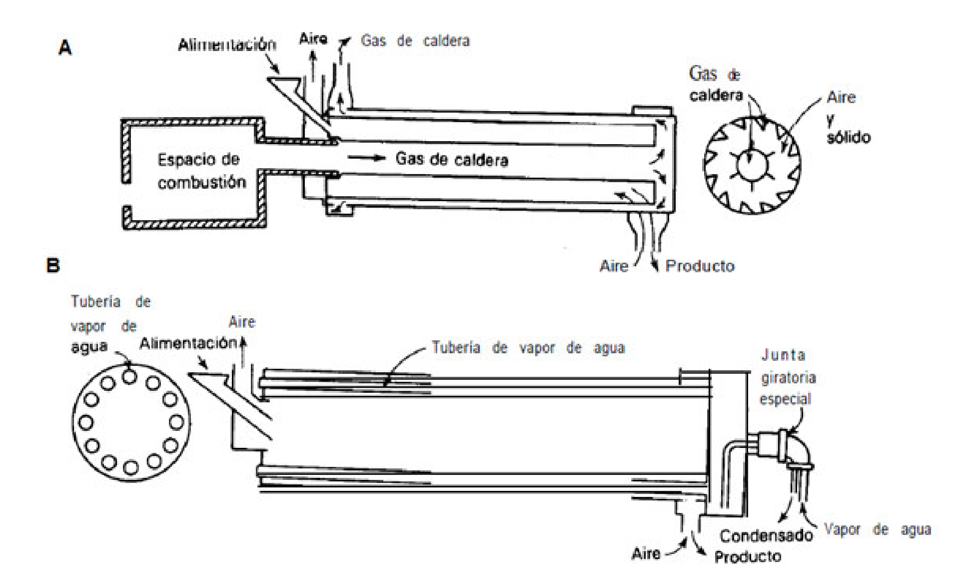


Figura 1.22. Secadores rotatorios A. indirectos; B. indirecto, con tuberías para vapor de agua (Treybal, 2001).

Para los sólidos que no se deben calentar a temperaturas elevadas y para los cuales es deseable el calor indirecto, como el alimento para ganado, granos para cerveza,

harina de pescado, algas, plumas y similares, se puede utilizar el secador de tubería con vapor que se muestra en la Figura 1.22B. El secador puede tener o no elevadores y puede construirse con una, dos o más hileras concéntricas de tubos calentados con vapor. Como los tubos giran con el secador, es necesaria una junta giratoria especial en donde se introduce el vapor y se separa el condensado. Con frecuencia se utiliza este tipo de secador cuando se necesita la recuperación del líquido evaporado (Treybal, 2001).

Secadores rotatorios de contacto indirecto, de tres pasos

Funcionan de la misma forma que los secadores directos de tres pasos, pero sin la ayuda de la corriente de gas, para el avance del sólido. Como tampoco se cuenta con la inclinación, estos equipos tienen un arreglo interno para propiciar el avance del sólido a través de este. Para explicar el funcionamiento de estos secadores, nos valdremos precisamente, de la primera patente, antes mencionada, para un secador de tambor multiusos de tres pasos (U.S. Patent No. 4,477,984, 1984), de contacto de calor indirecto. Este equipo, constan de cinco cilindros concéntricos enclavados mecánicamente, para una rotación al unísono (figuras 1.23A y B). El cilindro más interno define la cámara de combustión central o garganta central. Los otros cuatro cilindros definen conductos de sección transversal circular hueca, concéntricos alrededor de la cámara de combustión central.

Los conductos concéntricos, a la cámara de combustión central (donde entra el gas caliente, para la transferencia de calor indirecto, con el sólido del primer paso) son, el conducto o tubo interior de secado (donde entra el sólido, primer paso), el conducto o tubo intermedio de secado (segundo paso del sólido), el conducto intermedio de intercambio de calor (el gas caliente, al salir de la cámara central, entra a este conducto, y pasa, a través de unos tubos y, al transferir su calor con los pasos dos y tres, sale finalmente, a través de una chimenea) y el conducto o tubo exterior de secado (tercer paso del sólido), este arreglo, se aprecia en las figura 1.23A y B. Este equipo es del tipo de circulación del sólido, desde el conducto interior hasta el conducto exterior, sin embargo, a diferencia de los secadores explicados para el caso del secado directo, el sólido, no entra en el conducto central, sino en un conducto concéntrico al central, ya que, por el conducto central, solo circulan gases de combustión.

La cámara de combustión central y conducto intermedio de intercambio de calor, comprenden un sistema de intercambio de calor de dos pasos, completando dicho sistema, una chimenea, para ventilar los productos de combustión a la atmósfera. Los conductos interior, intermedio y exterior comprenden el sistema de secado de tres pasos, y cada uno de ellos, representa por separado, el secado en un secador convencional de un paso. El sistema de secado de tres pasos, está entrelazado por

el sistema de intercambio de calor de dos pasos, a través de sus paredes, por lo cual, solo se transfiere calor, evitando así la exposición directa del material al calor y la llama y la posible carbonización y destrucción del material, así como su oscurecimiento y deterioro.

El calor para el sistema de intercambio de calor es suministrado por un quemador de gas natural o aceite, ubicado en el extremo de la cámara de combustión central. El calor y los productos de combustión resultantes irradian y viajan a lo largo de dicha cámara y, al chocar con la placa de extremo, se desvían radialmente hacia fuera y, a continuación, retroceden mecánicamente a lo largo del secador a través del conducto de intercambio de calor. Después de recorrer la longitud del conducto de intercambio de calor, los subproductos de la combustión se ventilan a la atmósfera a través de una chimenea.

Los medios para mover el material lateralmente a través del sistema de secado de tres pasos son los "elevadores" y "deflectores" unidos a la pared interna superior de cada conducto (figuras 1.23A y B).

Los "elevadores" se extienden longitudinalmente a través del secador, y están dispuestos simétricamente alrededor de la periferia. Los "deflectores" son de vuelo helicoidal y conectan los "elevadores" entre sí. A medida que los conductos giran, el material contenido es llevado repetidamente a la parte superior por el "elevadores" y luego cae sobre los "deflectores". Como consecuencia, el material se desliza en la dirección predeterminada por el desplazamiento angular de los "deflectores".

Los "deflectores" del conducto interior y los del conducto exterior están dispuestos para deslizar el producto hacia el extremo posterior del secador, mientras que los "deflectores" del conducto intermedio están dispuestos para deslizar el producto en la dirección opuesta. Por lo tanto, el producto se voltea y fragmenta a medida que se desliza hacia adelante o hacia atrás a lo largo de los respectivos conductos y se desplaza radialmente al progresar de un conducto a otro, es decir, radialmente hacia afuera del conducto interno al intermedio, del conducto intermedio al externo y del externo a la descarga (figuras 1.23A y B).

El aire para eliminar el agua evaporada del material, que se está secando, se introduce en el secador desde el extremo posterior o de descarga del secador, específicamente, en el extremo posterior y en la periferia, del conducto exterior (final superior del tercer paso). El aire fluye a través de los tres conductos concéntricos, de forma sucesiva, Paso 3 $\rightarrow$ Paso 2 $\rightarrow$ Paso 1, en una dirección contraria al avance del material y airea el material a medida que cae y avanza, mediante la operación combinada de los "elevadores", "deflectores" y la rotación del conducto. Como

resultado, el aire que ingresa al secador, estará a una temperatura mínima y un contenido mínimo de humedad cuando fluye a través del tercer paso. Sin embargo, el aire que fluye a través del segundo y del primer paso (conductos intermedios e internos, respectivamente), estará expuesto a una temperatura uniformemente más alta y su contenido de calor se acelerará rápidamente, acompañado, de una aceleración en la absorción de humedad.

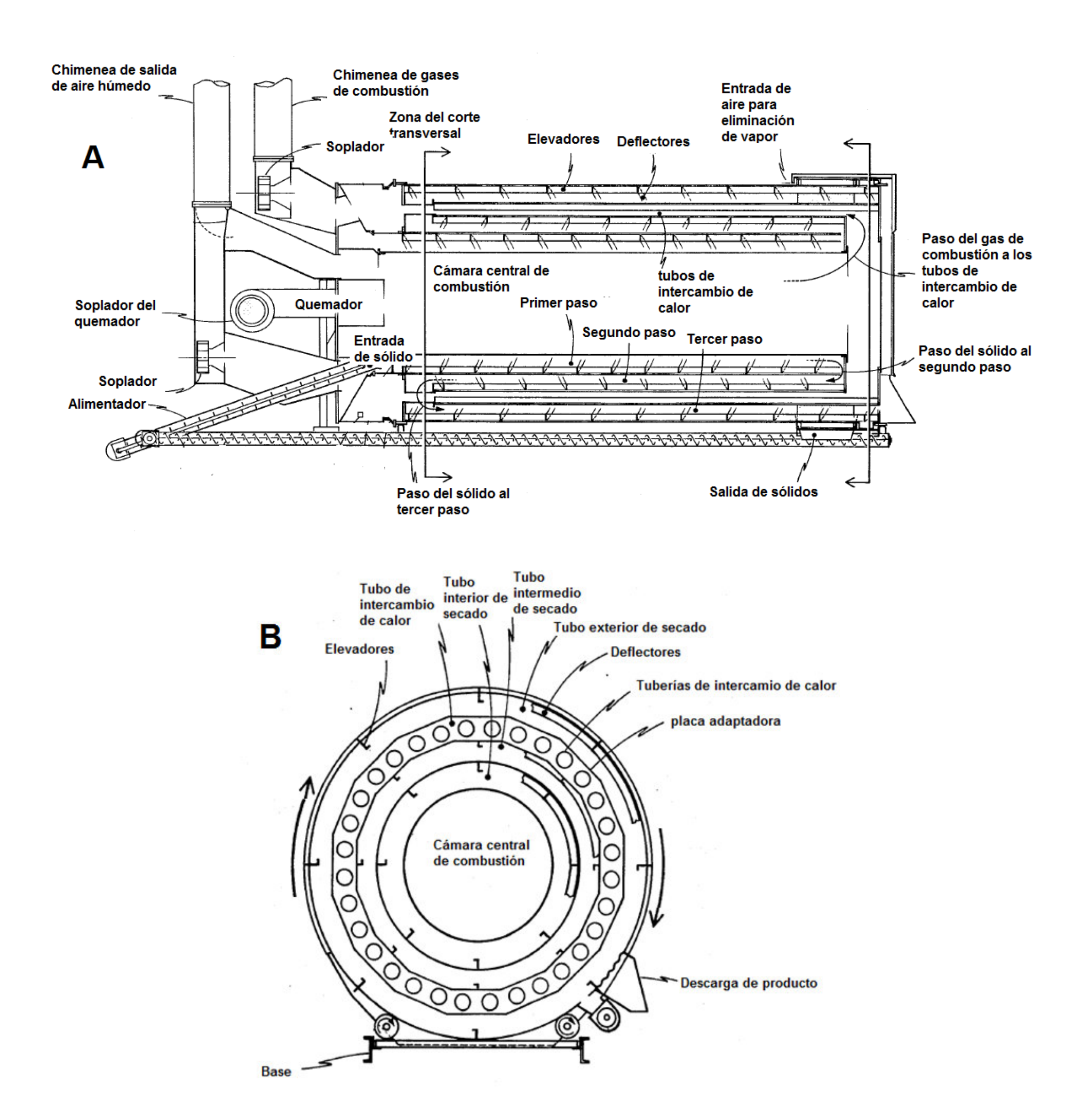


Figura 1.23. Secador rotatorio indirecto de tres pasos (A) Corte longitudinal, (B) Corte transversal (Adaptado de U.S. Patent No. 4,477,984, 1984).

Secadores rotatorios mixtos directo-indirecto

Estos secadores, son más económicos de manejar que los secadores directos, y pueden utilizarse, para sólidos que pueden secarse a altas temperaturas mediante un gas combustible, en especial, cuando los costos de combustible son altos y cuando se deben eliminar elevados porcentajes de humedad del sólido. En la Figura 1.24 se muestra un arreglo típico (Treybal, 2001).

En un secador de este tipo, el gas caliente puede entrar al tubo central, a una temperatura de entre 650 ºC y 980 ºC, saliendo a una temperatura de entre 200 ºC y 480 ºC, por efecto del intercambio de calor indirecto con el sólido, y al pasar por el espacio de secado anular, su temperatura puede caer entre 60 ºC y 70 ºC, registrada a la salida del secador. La lignita, carbón y coque pueden secarse en atmósfera inerte en este tipo de secador, a temperaturas relativamente altas, sin peligro de que se quemen o de provocar una explosión de polvos (Treybal, 2001).

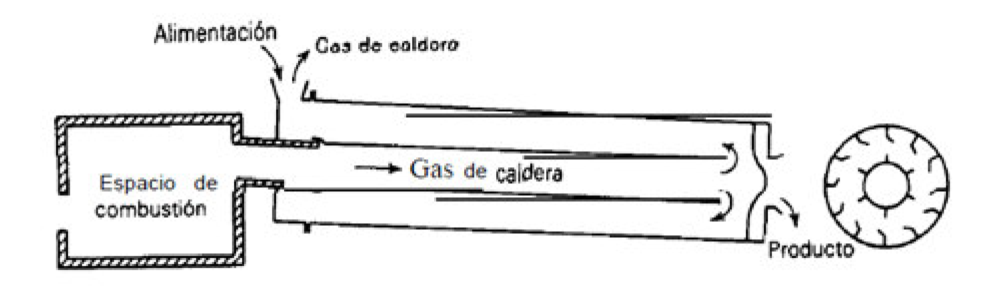


Figura 1.24. Secadores rotatorios mixto indirecto-directo (Treybal, 2001).

Al igual que para los temas de secadores de transporte pneumático y secadores de cinta transportadora, el participante del Curso Introductorio, de este **Programa Internacional de Cursos**, puede profundizar en el tema de secadores rotatorios, con un curso intermedio de fundamentos y principios de funcionamiento, de 3 Módulos de 4 horas de clase cada uno, para una duración de 12 horas, que se puede hacer al culminar este curso introductorio; y un curso avanzado, de simulación rigurosa y diseño, de 20 horas de clases (5 Módulos de 4 horas cada uno), que se inicia al terminar el curso intermedio. Las horas que se reconocen en el certificado, como capacitación, incluyen todos los elementos del proceso de enseñanza y aprendizaje y no solo las horas de clase.

El tipo de secador que se simulará en el Curso Avanzado, será el de secador de contacto directo de un paso a co-corriente, con aire caliente como gas de secado.

Actualmente, se cuenta con una alianza con Worldwide Consulting & Training SpA, con sede en Chile, empresa avalada por la International Organization For Education

Standards (ISFEDU), para la emisión de diplomas, con la certificación de calidad educativa ISFEDU CW5000:2019, para ofrecer un Diplomado en Diseño y Simulación de Secadores Industriales, bajo la modalidad blending, es decir, que los cursos pueden realizarse on line u on demand, y que abarca este Curso Introductorio y los cursos intermedio y avanzados de los tres temas de este **Programa Internacional de Cursos**, para un total de 106 horas de clases. Los interesados, pueden contactar al Profesor, a través de cualquiera de los canales, ya establecidos.

3. Sistema de unidades

Sistema Internacional de Unidades

El sistema Internacional de Unidades (Système International dÙnités, abreviado SI) fue adoptado en 1960 por la 11ava Conferencia General de Pesas y Medida, y ha sido aceptado en la mayoría de los países como sistema de medidas, tanto para la ciencia y la tecnología, como para el comercio y la industria (Arteaga *et al*., 2011). Este sistema es el que será utilizado en los cálculos del simulador.

El SI es el heredero del antiguo sistema MKSA (metros, kilogramo, segundo, ampere), propuesto por G. Giorgi, en 1902, y recomendado por la Conferencia General de Pesas y Medidas en su 9na edición, en 1948. Su adopción proviene del deseo de asegurar uniformidad mundial en las unidades usadas en las ciencias naturales, siendo el sistema más satisfactorio habido hasta la fecha, en cuanto cubre la mayor parte de las actividades humanas, y al ser universalmente aceptado, facilita la comunicación entre naciones, entre **diseñadores**, constructores, vendedores y clientes, y por lo tanto, el comercio internacional. Superó a otros sistemas de unidades como el CGS (centímetro, gramos, segundos), puesto que el tamaño de sus unidades, son adecuadas para las necesidades prácticas del hombre.

Es un sistema coherente, puesto que las unidades derivadas se forman a partir de las unidades base, sin otro factor de proporcionalidad, más que la unidad. Es un sistema adecuado para la educación, porque permite que los estudiantes realicen sus cálculos con mayor facilidad y eficiencia (Arteaga *et al*., 2011).

Cantidades y unidades base del SI

Las cantidades físicas están organizadas por convención en un sistema de dimensiones, que contemplan, siete cantidades, con su respectiva dimensión, y unidad, estas dos últimas con sus respectivos símbolos (ver Tabla 1.1). En el caso de las cantidades, se recomienda que su símbolo se escriba en itálica y la dimensión en letra romana sans serif mayúscula (Arteaga *et al*., 2011).

Tabla 1.1. Símbolos, dimensiones y unidades para las cantidades base.

Cantidad	Símbolo	Dimensión	Unidad	Símbolo
Longitud	*l*, *x*, *r*, etc.	L	metro	m
masa	*m*	M	kilogramo	kg
tiempo	*t*	T	segundos	s
Intensidad de corriente eléctrica	*I, i*	I	ampere	A
Temperatura	*T*	Θ	kelvin	K
Intensidad luminosa	I_V	J	candela	cd
Cantidad de sustancia	*n*	N	mol	mol

Fuente: Arteaga *et al*., 2011.

Según Pérez (2002), las unidades base, se definen de la siguiente forma.

- Metro (m): es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de 1/299 792 458 segundos.
- Kilogramo (kg): es la unidad de masa, la cual, es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo, sancionado por la Conferencia General de Pesas y Medidas en 1889 y depositado en el Pabellón de Breteuil, de Sévres (Francia, Sede de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas).
- Segundo (s): es la unidad de tiempo y expresa la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.
- Ampere (A): es la unidad de corriente eléctrica, y representa la intensidad de una corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos rectilíneos de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados a una distancia de un metro uno del otro en el vacío, produce entre estos conductores una fuerza igual a 0,2 micronewton por metro de longitud.
- Kelvin (K): es la unidad de temperatura termodinámica, y es la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. Un intervalo de temperatura puede también expresarse en grados Celsius ºC.
- Mol (mol): es la unidad de cantidad de materia de un sistema, que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12. Cuando se use el mol, deben especificarse las entidades de los elementos que pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o grupos especificados de esas partículas.
- Candela (cd): es la unidad de intensidad luminosa, y representa la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540 hertz x 1012 hertz y que tiene una dirección de (1/683) watt por estereorradián.

Cantidades y unidades derivadas del SI

Todas las otras cantidades, son cantidades derivadas y se generan por medio de ecuaciones de la física, a partir de las cantidades base. En general, la dimensión de cualquier cantidad, sea base o derivada, se describe en la forma de un producto dimensional:

$$Q = L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \cdot I^{\delta} \cdot \Theta^{\varepsilon} \cdot J^{\eta} \cdot N^{\xi} \qquad \text{Ecuación 3}$$

donde α, β, γ, δ, ε, η, ξ, son los exponentes dimensionales, los cuales son generalmente pequeños números enteros que pueden ser positivos, negativos o cero.

Para hallar la dimensión de una cantidad derivada, se aplican las reglas ordinarias del álgebra. De esta forma, la dimensión del área, será L^2, la de la velocidad LT^{-1}, la de la fuerza LMT^{-2}, y la de la energía L^2MT^{-2}. Cuando todos los exponentes, son 0, la cantidad es adimensional (Arteaga *et al*., 2011). Al igual que para las cantidades derivadas, estas mismas combinaciones algebraicas, pero para las unidades, generan unidades derivadas, las cuales pueden ser vistas de forma esquemática y andragógica, en la Figura 1.25. La notación usada en esta sección y más específicamente para la ecuación 3, es la planteada por Arteaga *et al*. (2011), en su obra original, y no forma parte de la notación del **Programa**, ya que no se contemplan cálculos básicos, de las dimensiones de cantidades derivadas.

Unidades suplementarias aceptadas por el SI

Igualmente, en la 11ava Conferencia General de Pesas y Medidas, se admitió un par adicional de unidades (Arteaga *et al*., 2011), que se pueden apreciar en la Figura 1.25 y se definen a continuación.

- El radián (rad), el cual es el ángulo plano entre dos radios de un círculo, que cortan en la circunferencia, un arco de longitud, igual a la del radio.
- El estereorradián (sr) es el ángulo sólido que, teniendo su vértice en el centro de una esfera, corta un área de superficie de la esfera, igual a la de un cuadrado, con lados de longitud, igual al radio de una esfera.

De la Figura 1.25, al multiplicar metro por metro, obtenemos el metro cuadrado, que es la unidad de área; al dividir el metro entre segundo, obtenemos la unidad de velocidad; dividiendo la unidad de velocidad entre segundo, nuevamente, obtenemos la unidad de aceleración. Entrando al mundo de las unidades con nombre propio, nos encontramos newton (unidad de fuerza), como resultado de multiplicar las unidades de masa por la de aceleración; el pascal (unidad de

presión), es el producto de dividir el newton, entre metros cuadrados; el joule (unidad de energía, trabajo, o cantidad de calor), que resulta de multiplicar, newton por metros; dividiendo joule entre kilogramos, se obtiene el gray, unidad de dosis absorbida. Dividiendo uno entre segundo, se obtiene la misma unidad, pero con diferente nombre, según el ámbito, el becquerel, para la actividad radioactiva y el hertz, para frecuencia. La unidad de flujo de calor, watt, viene dada por la división de joule, entre segundo.

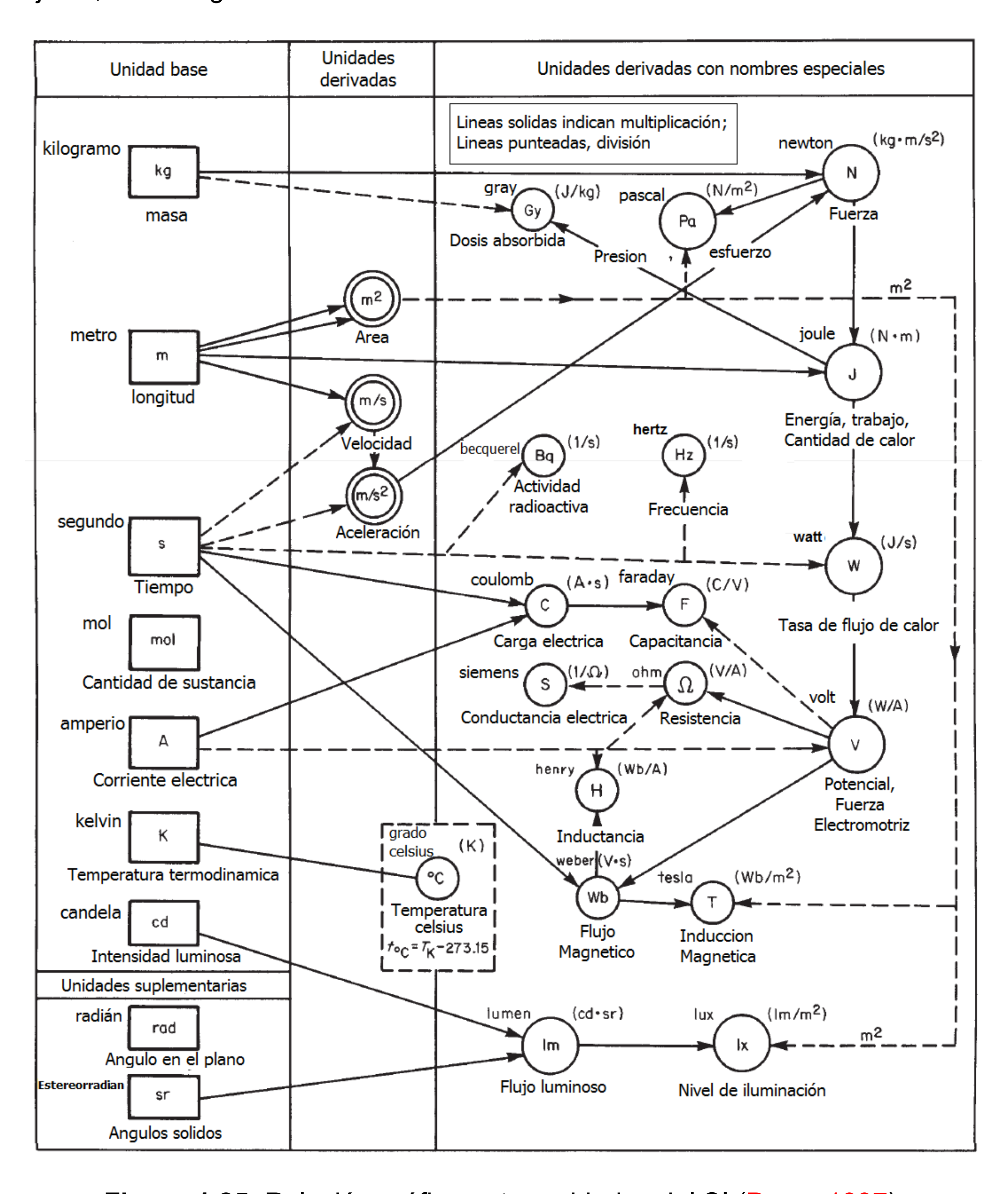


Figura 1.25. Relación gráfica entre unidades del SI (Perry, 1997).

Por otro lado, la unidad de potencial y fuerza electromotriz, el volt, viene de dividir el watt entre amperio; la unidad de carga eléctrica, el coulomb, viene de multiplicar ampere por segundo; la unidad de capacitancia, faraday, viene de dividir coulomb entre volt; dividiendo volt entre ampere, se obtiene la unidad de resistencia, ohm; dividiendo uno entre ohm, se obtiene la unidad de conductancia eléctrica, el siemens; el weber, la unidad de flujo magnético, viene de multiplicar volt por segundos; dividiendo el weber entre ampere, se obtiene la unidad de inductancia, el henry; y, dividiendo el weber entre metros cuadrados, se obtiene el tesla, que es la unidad de inducción magnética. Si multiplicamos la candela por el estereorradián, obtenemos el lumen, la unidad de flujo luminoso, y si dividimos este, entre metros cuadrados, obtenemos el lux, que es la unidad del nivel de iluminación. La temperatura se acepta como grados Celsius, ajustando los kelvin a dicha escala mediante la resta de 273,15.

Simplificación de grandes cantidades (SI)

Los múltiplos y submúltiplos en el SI, se expresan en base decimal, sin embargo, en lugar de escribir las potencias de 10, se utilizan prefijos, los cuales se pueden aprecia en la Figura 1.26.

Facto de multiplicación	Prefijo	Símbolo
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{18}$	exa	E
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$	peta	P
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	tera	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^{9}$	giga	G
$1\ 000\ 000 = 10^{6}$	mega	M
$1\ 000 = 10^{3}$	kilo	k
$100 = 10^{2}$	hecto*	h
$10 = 10^{1}$	deka*	da
$0.1 = 10^{-1}$	deci*	d
$0.01 = 10^{-2}$	centi	c
$0.001 = 10^{-3}$	milli	m
$0.000\ 001 = 10^{-6}$	micro	µ
$0.000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	nano	n
$0.000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	pico	p
$0.000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	femto	f
$0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	atto	a

* Generalmente son evitados

Figura 1.26. Prefijos del sistema internacional (Adaptado del Perry, 1997).

Reglas de uso del SI

Arteaga *et al*. (2011), presentan unas reglas básicas, para el correcto uso del SI:

1. Los símbolos se escriben a la derecha de los valores, dejando un espacio en blanco con la excepción de las unidades del ángulo plano, por ejemplo, 10 A, 270 K, 0 m, 40º 30` 20``.

2. El nombre completo de una unidad se escribe en letra minúscula, con la excepción de los grados Celsius, y cuando comience una frase o después de un punto. Por ejemplo, metros, kilogramo, newton y watt, es la forma correcta de escribir estas unidades y no Metros, Kilogramo, Newton y Watt, en medio de una frase.

3. Las unidades, sus múltiplos y submúltiplos, solo podrán designarse por sus nombres completos o sus símbolos correspondientes, reconocidos internacionalmente. No se permite otra representación, por ejemplo, metro es m, y no mts, mt, Mt o M; kilogramo es kg, y no, kgs, kgra, kilo o KG; kelvin es K y no ºK.

4. Las unidades cuyos nombres son de científicos, no se deben traducir. Por ejemplo, coulomb, no se debe escribir coulombio; joule, no se debe escribir julio; ampere, no se debe escribir, amperio; watt, no se debe escribir vatio; ohm, no se debe escribir ohmio.

5. La forma plural de las unidades solo se usa cuando se escribe su nombre y no en su símbolo. El plural en el nombre se aplica para cualquier valor, salvo para uno y menos uno. Por ejemplo, de forma correcta se debe escribir, 200 kilogramos o 200 kg; 1,05 metros o 1,05 m; 0 grados Celsius o 0 ºC; -2 grados Celsius o -2 ºC; 3 kelvins o 3 K; 0,9 metros o 0,9 m; 1 ampere o 1 A.

6. Todo valor numérico debe expresarse con su unidad, incluso cuando se repite o cuando se especifica la tolerancia, por ejemplo, 30 m ± 0,1 m; de las 14 h a las 18 h; entre 35 mm y 40 mm.

7. En cuanto a los prefijos, todos sus nombres, se escriben en minúsculas, por ejemplo, kilo (10^3), mega (10^6), mili (10^{-3}), micro (10^{-6}). Los símbolos de los prefijos para formar múltiplos, se escriben en mayúsculas, salvo el kilo por convención, por ejemplo, exa (E), giga (G), mega (M), kilo (k). Los símbolos de los prefijos para formar submúltiplos, se escriben en minúsculas, salvo el micro, que se escribe con la letra griega mi (μ), por ejemplo, mili (m), micro (μ), nano (n), pico (p). No se deja espacio entre la unidad y el prefijo, sea al escribir su nombre o su símbolo, por ejemplo, kilómetro (km), miliampere (mA), megavolt (MV), con la excepción de las unidades de masa, que se cambia el kilogramo a gramo, como unidad base, por

ejemplo, kilogramo (kg), megagramo (Mg), miligramo (mg), microgramo (µg). Es totalmente incorrecto usar más de un prefijo, por ejemplo, µm, no se debe escribir, mmm; nA, no se debe escribir, mµA; MW, no se debe escribir, kkW. Los prefijos deben ser escogidos, tal que, los valores numéricos, estén entre 1000 y 0,1, por ejemplo, es correcto escribir 750 km y no 750 000 m; 1,2 kg y no 1 200 g; 2,5 µs, y no 0,0025 ms; 51 mm, y no 0,051 m. Se debe evitar el uso de prefijos en el denominador de unidades compuestas, a excepción del kg, por ejemplo, se prefiere kN m^{-1} a N mm^{-1}; kg s^{-1} a g ms^{-1}. Para unidades de área y volumen se permiten los prefijos, hecto, deca, deci y centi, pero para el resto de las unidades se deben usar los prefijos preferidos, por ejemplo 10 cm^2, 1,25 dm^3.

8. Es indiferente utilizar la coma o el punto para indicar un valor decimal. Para valores entre 1 y -1, se debe poner un 0, antes del símbolo decimal. En números de muchas cifras, estos se agrupan de tres en tres, a partir del símbolo decimal, tanto para la parte entera, como para la parte decimal, por ejemplo, 57 438; 125 328; 0,628 352; 57 438,628. Este espacio es opcional, si el número es de 4 cifras, por ejemplo, 3200 o 3 200; 0,3285 o 0,328 5. Se permite simplificar los números grandes, con la regla de las 6N (10 con potencias de 6), millón (10^6), billón (10^{12}), trillón (10^{18}), cuatrillón (10^{24}), quintillón (10^{30}).

Es recomendable usar una sola forma de expresar decimales de forma homogénea a lo largo de un trabajo, para no causar confusión en el lector.

9. La multiplicación de dos o más unidades, se puede expresar de la siguiente manera, N·m, N.m, o N m. La división también se puede expresar de las siguientes formas, m/s o m s^{-1}. Para denominadores con más de una unidad, en la expresión con barra, se debe usar paréntesis para el denominador, por ejemplo, m kg/(s^2 A). Si el denominador tiene una división de unidades, se debe llevar a la forma de una sola barra, por ejemplo, m^2/(s/kg), se debe escribir, m^2 kg/s.

Transformación de unidades de usuario a sistema internacional

Dada la facilidad de hacer operaciones aritméticas con el sistema internacional, se recomienda poner en su simulador, un módulo de transformación de las unidades de las variables del sistema que maneja el usuario con más fluidez, al sistema internacional y viceversa, al obtener los resultados. La transformación de unidades, implica el uso de factores de proporcionalidad, calculados con valores de referencia, solo la temperatura, implica fórmulas más complejas porque no solo se refiere, a un cambio de proporción, sino a un cambio de escala. A continuación, algunos ejemplos.

Ejemplo Práctico Nº 1. Establezca el cálculo de la presión atmosférica, desde, las unidades de usuario, en milímetros de mercurio, a sistema internacional, en su simulador, y calcule como ejemplo, la transformación de 745 mmHg.

Unidades de usuario: mmHg

Unidades en Sistema Internacional: kPa

Factor de proporcionalidad: 101,325 kPa/760 mmHg = 0,1333 kPa/mmHg

Presión atmosférica, en unidades de usuario (mmHg): 745

Cálculo: 745·0,13333 = 99,33

Presión atmosférica, en Sistema Internacional (kPa): 99,33

Ejemplo Práctico Nº 2. Establezca el cálculo de la temperatura de entrada del gas al secador, en su simulador, de las unidades de usuario (grados Fahrenheit), a la unidad del sistema internacional (grados Celsius), reportadas en las hojas de toma de data de planta, y tomadas de un termómetro de campo, montado en el ducto de entrada de gas de secado al secador, el cual, fue instalado por el fabricante. Use 250 ºF, como ejemplo.

Unidades de usuario: ºF

Unidades en Sistema Internacional: ºC

Factor de escala: (5/9)·(°F − 32) (Ecuación 4)

Temperatura, en unidades de usuario (ºF): 250

Cálculo: (5/9)·(250 − 32)

Temperatura, en Sistema Internacional (ºC): 121,11

Ejemplo Práctico Nº 3. Los operadores de una planta, están acostumbrados a las unidades de pies por segundo (con un decimal, porque es el límite de precisión del instrumento de medición), para el ajuste de la velocidad lineal de entrada del gas un secador industrial, sin embargo, el simulador, reporta en metros sobre segundos. Permita que su simulador, reporte, esta velocidad, en pies por segundo, para que le sea sencillo a los operadores, establecer las condiciones operacionales del secador, dada la necesidad de validar su simulador, con varias corridas de planta. Utilice, 2 m/s, como ejemplo.

Unidades en Sistema Internacional: m/s

Unidades de usuario: ft/s

Factor de proporcionalidad: 1/0,3048 1/m/ft = 3,2808 ft/m

Velocidad, en Sistema Internacional (m/s): 2

Cálculo: 2·3,2808 = 6,6

Velocidad, en unidades de usuario (ft/s): 6,6

Ejercicios propuestos, para las prácticas de cálculos, para el evaluativo sobre transformación de unidades de usuario y en sistema internacional, pueden encontrarse en la **Guía de Evaluación del Módulo I**, así como las tablas de transformación de unidades al sistema internacional, del Perry, como anexo de dicha guía.

Llegado a este punto, ya podemos sacar de la caja negra un par de módulos de simulación, como se muestra en la Figura 1.27, los cuales, debe tener el simulador, siendo uno el de la transformación de los valores de las variables de entrada, en unidades que son de fácil entendimiento para el usuario (unidades de usuario), como libras, pies cúbicos por minuto, etc., a unidades en el sistema internacional, ideales para los cálculos complejos. El otro módulo de simulación, corresponde a aquel que, una vez generados las variables de salida por parte del simulador, transforma dichas variables de salida del sistema internacional a aquellas unidades que el usuario entienda perfectamente. También es el caso de variables de entrada y salida establecidas en las unidades del controlador o medidor disponible en planta.

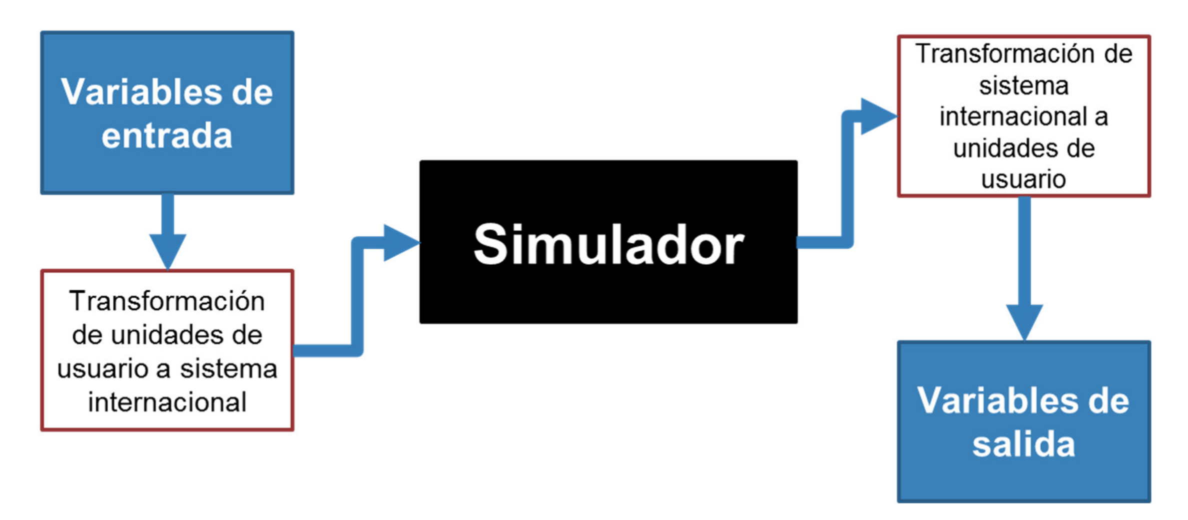


Figura 1.27. Diagrama de bloques inicial de un simulador, incluyendo los bloques para la transformación de las unidades de usuario, a sistema internacional, para las variables de entrada, y viceversa, para las variables de salida.

4. Notación y transformación de unidades

Notación que se usará en el Programa (overview de todo el Programa)

Por el hecho de tener por delante, muchos cálculos complejos y un gran número de variables, tendremos en el **Programa**, una notación propia.

En la Tabla 1.2, se presentan, las variables relacionadas con el balance de masa global, en el secador. Se tiene que, los flujos másicos totales de sólido y gas, los designaremos *S* y *G*, respectivamente, identificando con un subíndice si son de entrada al secador (*eD*), de salida del secador (*sD*), o entrada al soplador de entrada (*eK1*). En caso de ser flujos secos, no llevan subíndices, puesto que no varían, a lo largo del paso por el secador. La humedad en base húmeda (bh), la designaremos con *x*, y la humedad en base seca (bs), con *X*. La humedad del gas, la designaremos con *y*, la humedad absoluta, con *Y*, y la humedad relativa con *HR*, e igualmente, un subíndice denotará si es entrada o salida del secador, o entrada al soplador de entrada. Si alguna de estas humedades, se presenta en términos porcentuales, le antecederemos un *%*, que normalmente se usa para la humedad en base húmeda del sólido.

En la Tabla 1.3, se presentan, las variables relacionadas con el balance de energía global, en el secador. Los flujos de calor, se representarán por medio de *q*, las temperaturas con *T*, y los diferenciales de calor ganado o perdido con *ΔQ*. Se observa que las corrientes se desglosan en sus componentes principales para contabilizar el flujo de calor por separado, incluyendo, aquellas corrientes que cambian de fase, siendo esta la metodología más adecuada, para el entendimiento y el manejo matemático del complejo intercambio simultáneo de calor y masa que ocurre en el secador.

Los calores asociados al gas y al sólido, se denotan con los subíndices, *G* y *S*, respectivamente (Tabla 1.3). Entradas y salidas, con los subíndices, *e* y *s*, respectivamente, siendo el secador denotado con *D* y el soplador de entrada con *K1*. En caso de que sea un flujo de calor desglosado, el subíndice *GS*, denota gas seco; *SS*, sólido seco; *AL*, agua líquida, la cual, si no se vaporiza, se acompaña con *nV*, y si se vaporiza, con *V*; *VA*, vapor de agua, el cual, si es el que se transfiere, se acompaña con *T*, y si es el que entró con la mezcla gaseosa con *eG*. Para los diferenciales de calor, el subíndice *H*, denota el aportado por el calentador al aire; *P*, el calor perdido al ambiente; *TransfG*, el calor transferido por el gas; *TransfS*, el calor recibido por el sólido y *vapA*, el calor total aportado al agua para su eliminación.

Tabla 1.2. Notación para las variables del balance de masa global del secador.

Variable	Símbolo	Unidad
Flujo de gas húmedo de entrada al sistema[1]	G_{eK1}	kg/s
Flujo de gas húmedo de entrada al secador	G_{eD}	kg/s
Flujo de gas húmedo de salida del secador	G_{sD}	kg/s
Flujo de gas húmedo de recirculación	G_{RD}	kg/s
Se cumple que[1] $G_{eK1} = G_{eD}$ (Ecuación 5)		
Flujo de gas seco	G	kg/s
Humedad de gas de entrada al soplador	y_{eK1}	kg/kg*
Humedad de gas de entrada al secador	y_{eD}	kg/kg*
Humedad de gas de salida del secador[2]	y_{sD}	kg/kg*
Humedad absoluta de entrada al soplador	Y_{eK1}	kg/kg**
Humedad absoluta de salida del calentador y entrada al secador	Y_{eD}	kg/kg**
Humedad absoluta de salida del secador[2]	Y_{sD}	kg/kg**
Humedad relativa de entrada al soplador	HR_{eK1}	%
Humedad relativa de salida del calentador y entrada al secador[3]	HR_{eD}	%
Humedad relativa de salida del secador[2,3]	HR_{sD}	%
Flujo total de agua absorbida por el gas	m_{AAGD}	kg/s
Se cumple que[1] $y_{eK1} = y_{eD}$ (Ecuación 6) y $Y_{eK1} = Y_{eD}$ (Ecuación 7)		
Flujo de sólido húmedo de entrada al secador	S_{eD}	kg/s
Flujo de sólido húmedo de salida del secador	S_{sD}	kg/s
Flujo de sólido seco	S	kg/s
Humedad del sólido de entrada al secador (bh)	$\%x_{eD}$	%
Humedad de salida del sólido del secador (bh)	$\%x_{sD}$	%
Humedad del sólido de entrada al secador (bs)	X_{eD}	kg/kg***
Humedad de salida del sólido del secador (bs)	X_{sD}	kg/kg***
Flujo total de agua eliminada del sólido	m_{AESD}	kg/s
Se cumple que $m_{AAGD} = m_{AESD}$ (Ecuación 8)		

[1]Para secadores rotatorios y de transporte pneumático de calentamiento de gas de secado, indirecto, el aire entra al sistema, pero no al secador directamente, porque primero entra a la admisión del soplador, para luego ser calentado y en algunos casos, entra directamente al calentador. [2]Corresponden igualmente a la de la corriente de recirculación, para el secador de cinta transportadora, y en este caso, se cambia el subíndice *sD* por *R*. [3]Estas humedades relativas se consideran mucho menor a 0,01 % (<<0,1 %), cuando las temperaturas en estos dos puntos, exceden los 100 ºC, pero en realidad son indeterminables. *kilogramos de agua entre kilogramos de gas húmedo. **kilogramos de agua sobre kilogramos de aire seco. ***kilogramos de agua sobre kilogramos de sólido seco. El subíndice *K1*, denota el soplador de succión de aire hacia el sistema, *D*, secador, *e*, entrada y *s*, salida. bh, base húmeda; bs, base seca.

Tal como se nota en la Tabla 1.4, las entalpías se denotan con h, el calor específico con c, el calor húmedo con c_H, el volumen húmedo con v_H, usando estas dos últimas

variables, una terminología propia de la psicrometría[‡‡], ya que solo aplica para las corrientes gaseosas. La densidad se denota con ρ. Cada corriente presente en el secador, tiene entonces una entalpía, un calor específico o calor húmedo, en función si se habla de sólido o gas, respectivamente, aplicando lo mismo para la densidad y el volumen húmedo, respectivamente, y dicha pertenencia se especifica cómo subíndice. La humedad de saturación del gas y la presión de saturación, se denotan con el superíndice *sat*. Los calores latentes y entalpías de humidificación, se denotan con *H*, y con sus respectivos subíndices, *lv* y *A*.

Tabla 1.3. Notación para las variables del balance de energía global del secador.

Variable	Símbolo	Unidad
Temperatura ambiente	T_{amb}	ºC
Temperatura de entrada del gas al secador	T_{GeD}	ºC
Temperatura de salida del gas del secador	T_{GsD}	ºC
Temperatura de entrada del sólido al secador	T_{SeD}	ºC
Temperatura de salida del sólido al secador	T_{SsD}	ºC
Normalmente se cumple que $T_{SeD} = T_{amb}$ (Ecuación 9)		
Calor de entrada del gas al soplador	q_{GeK1}	kW
Calor del gas seco en la mezcla gaseosa de entrada al soplador	q_{GSeK1}	kW
Calor del vapor de agua en la mezcla gaseosa de entrada al soplador	q_{VAGeK1}	kW
Se cumple que $q_{GeK1} = q_{GSeK1} + q_{VAGeK1}$ (Ecuación 10)		
Calor aportado por el calderín al gas de secado	ΔQ_H	kW
Calor de entrada del gas al secador	q_{GeD}	kW
Calor del gas seco en la mezcla gaseosa de entrada al secador	q_{GSeD}	kW
Calor del vapor de agua en la mezcla gaseosa de entrada al secador	q_{VAGeD}	kW
Se cumple que $q_{GeD} = q_{GSeD} + q_{VAGeD}$ (Ecuación 11)		
Calor de salida del gas del secador	q_{GsD}	kW
Calor del gas seco en la mezcla gaseosa de salida del secador	q_{GSsD}	kW
Calor del vapor de agua en la mezcla gaseosa de salida del secador, y que entró con éste	q_{VAeGsD}	kW
Calor del vapor de agua transferido al gas y que sale a las condiciones de salida de éste	q_{VATGsD}	kW
Calor total del vapor de agua en la mezcla gaseosa de salida del secador	q_{VAGsD}	kW
Se cumple que $q_{VAGsD} = q_{VAeGsD} + q_{VATGsD}$ (Ecuación 12) y $q_{GsD} = q_{VAGsD} + q_{GSsD}$ (Ecuación 13)		
Calor perdido al ambiente	ΔQ_P	kW

[‡‡] Rama de la Ciencia dedicada al estudio de las propiedades termodinámicas de las mezclas de aire y vapor de agua.

Tabla 1.3. Notación para las variables del balance de energía global del secador (Continuación).

Variable	Símbolo	Unidad
Calor del sólido de entrada al secador	q_{SeD}	kW
Calor del sólido seco de entrada	q_{SSeD}	kW
Calor total del agua líquida que entra con el sólido	q_{ALSeD}	kW
Calor del agua líquida que entra con el sólido y no se evapora	$q_{ALnVSeD}$	kW
Calor del agua líquida que entra con el sólido y se elimina por vaporización	q_{ALVSeD}	kW
Se cumple que $q_{ALSeD} = q_{ALnVSeD} + q_{ALVSeD}$ (Ecuación 14) y $q_{SeD} = q_{ALSeD} + q_{SSeD}$ (Ecuación 15)		
Calor del sólido de salida del secador	q_{SsD}	kW
Calor del sólido seco de salida del secador	q_{SSsD}	kW
Calor del agua líquida que entra con el sólido, y que no se evapora	q_{ALSsD}	kW
Se cumple que $q_{SsD} = q_{ALSsD} + q_{SSsD}$ (Ecuación 16)		
Calor total de entrada al secador	q_{eD}	kW
Calor total de salida del secador	q_{sD}	kW
Se cumple que $q_{eD} = q_{sD}$ (Ecuación 17) $q_{eD} = q_{GeD} + q_{SeD} = q_{VAGeD} + q_{GSeD} + q_{ALnVSeD} + q_{ALVSeD} + q_{SSeD}$ (Ecuación 18) y $q_{sD} = q_{GsD} + q_{SsD} + \Delta Q_P = q_{VAeGsD} + q_{VATGsD} + q_{GSsD} + q_{ALSsD} + q_{SSsD} + \Delta Q_P$ (Ecuación 19)		
Calor transferido por el gas	$\Delta Q_{TransfG}$	kW
Calor transferido al sólido	$\Delta Q_{TransfS}$	kW
Calor para vaporizar el agua[*]	ΔQ_{vapA}	kW
Se cumple que $\Delta Q_H = q_{GeD} – q_{GeK1}$[**] (Ecuación 20) $\Delta Q_{TransfG} = q_{VAGeD} + q_{GSeD} - q_{VAeGsD} - q_{VATGsD} - q_{GSsD} - \Delta Q_P$[***] (Ecuación 21) $\Delta Q_{TransfS} = q_{ALSsD} + q_{SSsD} - q_{ALnVSeD} - q_{ALVSeD} - q_{SSeD}$ (Ecuación 22) y $\Delta Q_{vapA} = q_{VATGsD} - q_{ALVSeD}$[§] (Ecuación 23)		

[*]Se suele obviar el calor sensible para efectos de evaluación del desempeño del secador. [**]En caso de que el gas de secado se caliente de forma indirecta, solamente. [***]En caso de los secadores rotatorios, una parte del calor perdido, se atribuye al sólido que está en el fondo del secador y en los elevadores, en contacto directo con la parte interna de la carcasa del secador. [§]Solo una fracción de este calor se usa para la eficacia térmica. El hecho de usar kW, tiene que ver con que los valores numéricos de estas variables, estén entre 1000 y 0,1, tal como lo establecen las reglas del SI.

Los elementos presentes en la Tabla 1.5, se explicarán con detalle en el Módulo 2, de este Programa de capacitación, habiendo sido explicados ya, algunos de ellos. Se pueden apreciar, las variables de la Solución de Crank a la Segunda Ley de Fick, la cual, es la ecuación cinética más ampliamente usada en la literatura científica.

Tabla 1.4. Propiedades termofísicas de las corrientes globales del secador.

Variable	Símbolo	Unidad
Entalpía de entrada del gas al soplador	h_{GeK1}	kJ/kg
Entalpía de entrada del gas al secador	h_{GeD}	kJ/kg
Entalpía de gas de salida del secador	h_{GsD}	kJ/kg
Entalpía de entrada del sólido al secador	h_{SeD}	kJ/kg
Entalpía de sólido de salida del secador	h_{SsD}	kJ/kg
Entalpía de entrada del gas seco al soplador	h_{GSeK1}	kJ/kg*
Entalpía de entrada del gas seco al secador	h_{GSeD}	kJ/kg*
Entalpía de gas seco de salida del secador	h_{GSsD}	kJ/kg*
Entalpía de entrada del sólido seco al secador	h_{SSeD}	kJ/kg*
Entalpía de sólido de salida seco del secador	h_{SSsD}	kJ/kg*
Calor específico de gas de entrada al soplador	c_{GeK1}	kJ/(kg·K)
Calor específico de gas de entrada al secador	c_{GeD}	kJ/(kg·K)
Calor específico de gas de salida del secador	c_{GsD}	kJ/(kg·K)
Calor específico del sólido de entrada al secador	c_{SeD}	kJ/(kg·K)
Calor específico del sólido de salida del secador	c_{SsD}	kJ/(kg·K)
Calor húmedo** de gas de entrada al soplador	c_{HeK1}	kJ/(kg·K)*
Calor húmedo** de gas de entrada al secador	c_{HeD}	kJ/(kg·K)*
Calor húmedo** de gas de salida del secador	c_{HsD}	kJ/(kg·K)*
Calor específico del sólido seco de entrada al secador	c_{SSeD}	kJ/(kg·K)*
Calor específico del sólido seco de salida del secador	c_{SSsD}	kJ/(kg·K)*
Volumen húmedo** de gas de entrada al soplador	v_{HeK1}	m^3/kg*
Volumen húmedo** de gas de entrada al secador	v_{HeD}	m^3/kg*
Volumen húmedo** de gas de salida del secador	v_{HsD}	m^3/kg*
Densidad del gas de entrada al soplador	ρ_{GeK1}	m^3/kg
Densidad del gas de entrada al secador	ρ_{GeD}	m^3/kg
Densidad del gas de salida del secador	ρ_{GsD}	m^3/kg
Densidad del sólido de entrada al secador	ρ_{SeD}	m^3/kg
Densidad del sólido de salida del secador	ρ_{SsD}	m^3/kg
Humedad absoluta de saturación del gas***	Y^{sat}	kg/kg§
Presión de saturación del agua***	p^{sat}	kPa
Calor latente de vaporización del agua***	H_{lv}	kJ/kg
Entalpía de humidificación***,[1]	H_A	kJ/kg

El hecho de usar kJ y no J, o kPa y no Pa, tiene que ver con que los valores numéricos de estas variables, estén entre 1000 y 0,1, tal como lo establecen las reglas del SI. *Los kilogramos en el denominador corresponden a material seco, gas o sólido, dependiendo a cuál corriente corresponda. **Expresiones propias de la psicrometría. ***Estas propiedades se especifican, a las condiciones de temperatura, presión o humedad (solo para H_A), a la que fueron calculadas, poniendo como subíndice, la corriente a la que corresponda dicha condición (*eK1*, *eD*, *sD*, *eD*, *sD*). [1]Se explica en el **Módulo 3** de cualquiera de los cursos intermedios. §kilogramos de agua sobre kilogramos de aire seco.

Así mismo se encuentran en la Tabla 1.5, los parámetros de las ecuaciones empíricas de cinética de secado en capa fina, los parámetros de la ecuación de Faneite-Mosquera y los criterios estadísticos de medición de desempeño y de selección de modelos cinéticos.

Las variables relacionadas a las propiedades de transporte de las corrientes para la capa *k*, del volumen finito *i*, se presentan en la Tabla 1.6. Esta división del secador por capas y volúmenes, solo se usa en secadores de cinta transportadora (Figura 1.28), siendo la división solo en volúmenes finitos, para secadores rotatorios y de transporte pneumático, tal como se ve en las figuras 1.29A y B, respectivamente.

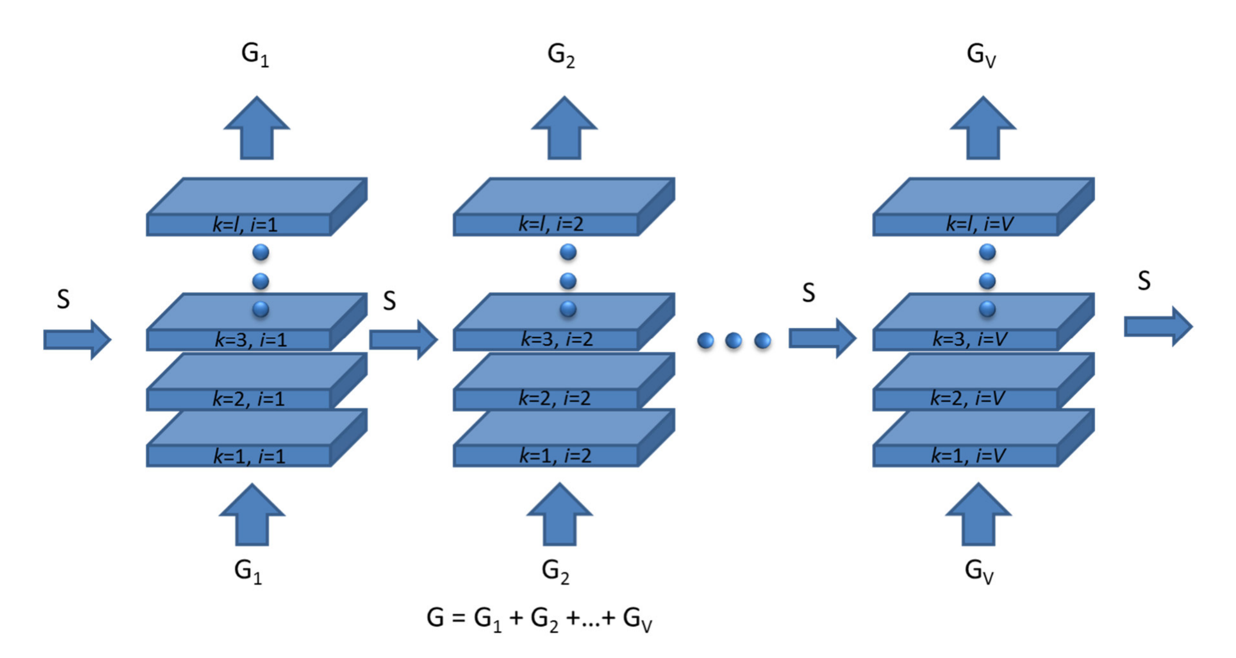


Figura 1.28. Detalle de las capas y volúmenes finitos en los que se divide el lecho de un secador de cinta transportadora para la simulación rigurosa.

En cada capa y volumen (Figura 1.28), el sólido presenta una velocidad de secado y un posible encogimiento, los cuales, deben ser calculados con modelos generados a partir de pruebas de laboratorio. Para determinar la velocidad de secado, despucés del primer volumen finito, se debe hacer uso del tiempo corregido, cuyo concepto se explicará en los módulos avanzados.

En cada capa *k* y volumen *i*, se presenta un balance de masa, de energía y de cantidad de movimiento, con lo cual se obtienen los perfiles internos de las variables operativas y los flujos y condiciones de las corrientes y flujos de calor de salida del secador. Para las variables del balance de masa, en unidades de ingeniería, de una capa *k*, de un volumen *i* dado, por ejemplo, se tiene que, el fujo de sólido seco de entrada, viene dado por $S_{k,i-1}$; y de salida $S_{k,i}$.

Tabla 1.5. Variables del modelado de la cinética de secado en capa fina.

Variable	Símbolo	Unidad
Humedad inicial (bs)	X_0	kg/kg*
Humedad de equilibrio (bs)	X_e	kg/kg*
Humedad de pseudo-equilibrio dinámico (bs)	X_{dpe}	kg/kg*
Fracción de humedad no eliminada	M_R	Adimensional
Rapidez de secado	*Rs*	kg/(kg·s)*
Difusividad efectiva	*Deff*	m^2/s
tiempo	*t*	s
Temperatura	*T*	K o ºC
Energía de activación	*Ea*	kJ/mol
Altura de capa	*z*	m
Constante universal de los gases	*R*	kJ/(mol·K)
Encogimiento	D_R	Adimensional
Constante de cinética de secado en capa fina	*a*	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	*b*	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	*c*	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	g_0	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	h_0	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	*k*	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	k_0	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	k_1	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	m_0	Adimensional**
Constante de cinética de secado en capa fina	*n*	Adimensional**
Constante ecuación de Faneite-Mosquera	m_m	$m^2/(K·s)$
Constante ecuación de Faneite-Mosquera	b_m	m^2/s
Constante ecuación de Faneite-Mosquera	m_b	$m^2/(K·s)$
Constante ecuación de Faneite-Mosquera	b_b	m^2/s
Número de datos experimentales	*N*	observaciones
Número de constantes del modelo	n_c	constantes
Desviación estándar	*DS*	Adimensional***
Coeficiente de correlación	*r*	Adimensional***
Coeficiente de determinación	r^2	Adimensional***
Eficiencia del modelo	η_m	Adimensional***
Suma de residuales	*RS*	Adimensional***
Error promedio sesgado	*MBE*	Adimensional***
Desviación relativa promedio	*MRD*	Adimensional***
Suma de residuales al cuadrado	*RSS*	Adimensional***
Suma de residuales al cuadrado promedio	*MSE*	Adimensional***
Raíz de la suma de residuales al cuadrado prom.	*RMSE*	Adimensional***
Ji cuadrado	χ^2	Adimensional***
Error estándar de estimación	*SEE*	Adimensional***

bs: base seca; prom., promedio. *kilogramos de agua sobre kilogramos de sólido seco. **Si está dentro del exponencial, adquiere la unidad que permita que dentro del exponencial, resulte un número adimensional (mayor explicación en el Módulo 2). ***Son adimensionales porque están referidos a M_R (mayor explicación en el Módulo 2).

El flujo de gas seco, de entrada, G_i y salida G_i. Humedad en base seca del sólido de entrada $X_{k,i-1}$, y de salida $X_{k,i}$. La humedad absoluta del gas de entrada $Y_{k-1,i}$, y de salida $Y_{k,i}$. En cuanto a la notación para unidades coloquiales, se tiene que, el fujo de sólido húmedo o total de entrada, viene dado por $S_{ek,i}$; y de salida $S_{sk,i}$. El flujo total de gas de entrada, $G_{ek,i}$, y de salida $G_{sk,i}$. La humedad en base húmeda del sólido de entrada $x_{ek,i}$, y de salida $x_{sk,i}$. La humedad del gas de entrada $y_{ek,i}$, y de salida $y_{sk,i}$.

Tabla 1.6. Propiedades de transporte de las corrientes de entrada y salida, y cinéticas de secado, de la capa k^*, en el volumen finito *i*.

Variable	Símbolo	Unidad
Número de volúmenes finitos	V	Adimensional
Número de capas	l	Adimensional
Corrección del tiempo de secado en la capa *k* del volumen *i*	$t_{crrk,i}$	s
Rapidez de secado en la capa *k* del volumen *i*	$Rs_{k,i}$	kg/(kg.s)**
Encogimiento del sólido en la capa *k* del volumen *i*	$D_{Rk.i}$	Adimensional
Viscosidad dinámica del gas de entrada a la capa *k*, en el volumen *i****	$\mu_{Gk-1,i-1}$	kg/(m.s)
Conductividad térmica del gas de entrada a la capa *k*, en el volumen *i****	$\lambda_{Gk-1,i-1}$	kW/(m.K)
Número de Reynolds del gas de entrada a la capa *k*, en el volumen *i****	$Re_{Gk-1,i-1}$	Adimensional
Número de Reynolds de la partícula de entrada a la capa *k*, en el volumen *i****	$Re_{Pk-1,i-1}$	Adimensional
Viscosidad dinámica del gas de salida de la capa *k*, en el volumen *i*	$\mu_{Gk,i}$	kg/(m.s)
Conductividad térmica del gas de salida gas de salida de la capa *k*, en el volumen *i*	$\lambda_{Gk,i}$	kW/(m.K)
Número de Reynolds del gas de salida gas de salida de la capa *k*, en el volumen *i*	$Re_{Gk,i}$	Adimensional
Número de Reynolds de la partícula de salida gas de salida de la capa *k*, en el volumen *i*	$Re_{Pk,i}$	Adimensional

*Para secadores rotatorios y de transporte pneumático, no aplica la división por capas. **kilogramos de agua, sobre kilogramos de sólido seco por segundo. ***Para secadores de cinta transportadora, el subíndice *i-1* cambia a *i*. El hecho de usar kW y no W, tiene que ver con que los valores numéricos de estas variables, estén entre 1000 y 0,1, tal como lo establecen las reglas del SI. El uso básico para los números adimensionales, tal como *Re*, es para comparar dos fuerzas impulsoras, una se encuentra en el numerador y la otra en el denominador y para desarrollar correlaciones generalizadas. Esto se estudiará con detalle a partir del Módulos 3.

A pesar de que el flujo de gas seco es contante a lo largo del secador, o a la largo del volumen finito (Figura 1.28), no ocurre lo mismo con la presión, la temperatura

y la humedad, razón por la cual, hay propiedades de transporte específicas para cada paso de una capa a otra y de cada volumen a otro (Tabla 1.6). El número de Reynolds se denota con *Re*, como es tradición en la bibliografía científica, la viscosidad dinámica μ, y la conductividad térmica λ.

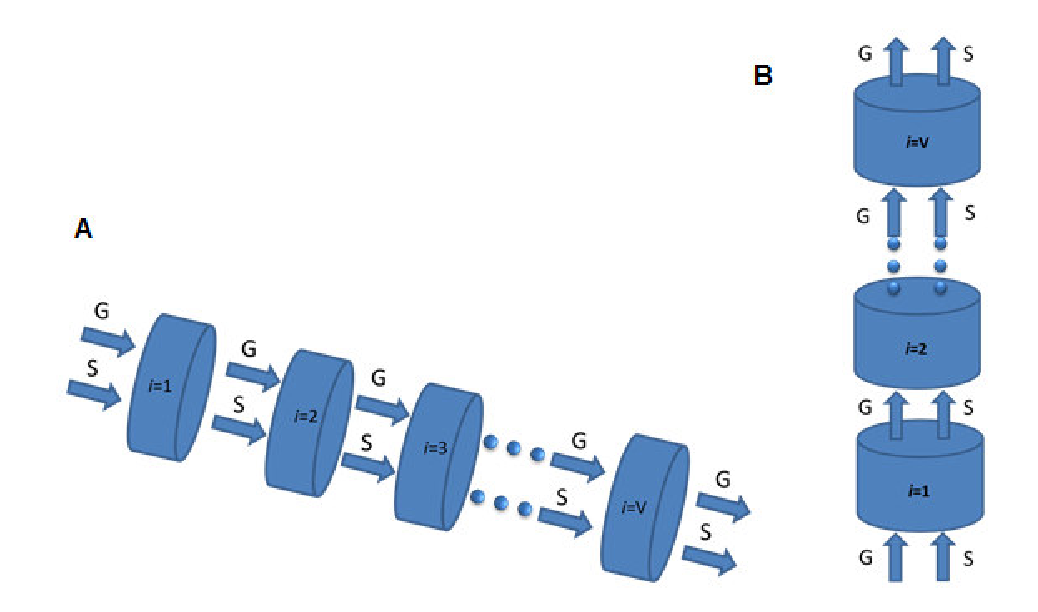


Figura 1.29. Detalle los volúmenes en los que se divide un secador rotatorio (A), y un secador de transporte pneumático (B).

En la Tabla 1.7, se presentan las propiedades de transporte de la capa *k*, en el volumen finito *i*, promedio, que tienen que ver con el transporte interfacial de masa o energía sólido/gas. Al igual que para la Tabla 1.6, la división en capas, solo se usa para los secadores de cinta transportadora.

Los números de Sherwood, de Stanton, de Schmidt, de Péclet y de Biot y, el coeficiente de transferencia interfacial, se designan con *Sh*, *St*, *Sc*, *Pe*, *Bi* y *h*, respectivamente, indicando con una *m*, como subíndice, aquellos que relacionados con la masa y *H* con energía (Tabla 1.7). La difusividad másica y térmica se designan con *D* y α, respectivamente, y el coeficiente de transferencia de calor volumétrico, U_{VA}. Como todas estas propiedades, dependen de las condiciones promedio del sólido y el gas en cada capa y/o volumen, estos se identifican con los subíndices correspondientes *k* e *i*, separados con una coma.

La notación para las propiedades de la partícula, de lechos de partículas fijos y fluidizados y variables de las ecuaciones del balance de *momentum*, se muestra en la Tabla 1.8. **Hay que destacar que las propiedades de partícula, aplican principalmente para el secador de transporte pneumático y las tuberías que pudieran transportar eventualmente una carga de sólidos, por ejemplo, la**

tubería que va del secador al ciclón y la tubería que va del ciclón al filtro, en el secador rotatorio. También aplica para los secadores rotatorios y de cinta transportadora para chequear que no haya un excesivo arrastre.

Tabla 1.7. Propiedades de transporte de la capa *k*, en el volumen finito *i*, promedio, que tienen que ver con el transporte interfacial de masa o energía sólido/gas.

Variable	Símbolo	Unidad
Número de Sherwood en la capa *k*, del volumen *i*	$Sh_{k,i}$	Adimensional
Número de Stanton para transferencia de masa en la capa *k*, del volumen *i*	$St_{mk,i}$	Adimensional
Número de Schmidt en la capa *k*, del volumen *i*	$Sc_{k,i}$	Adimensional
Número de Péclet para la transferencia de masa en la capa *k*, del volumen *i*	$Pe_{mk,i}$	Adimensional
Número Biot de transferencia de masa en la capa *k*, del volumen *i*	$Bi_{mk,i}$	Adimensional
Coeficiente de transferencia de masa interfacial en la capa *k*, del volumen *i*	$h_{mk,i}$	kg/(m^2.s)
Coeficiente de difusión en la capa *k*, del volumen *i*	$D_{k,i}$	m^2/s
Número de Nusselt en la capa *k*, del volumen *i*	$Nu_{k,i}$	Adimensional
Número de Stanton para transferencia de calor	$St_{Hk,i}$	Adimensional
Número de Prandtl en la capa *k*, del volumen *i*	$Pr_{k,i}$	Adimensional
Número de Péclet para la transferencia de calor en la capa *k*, del volumen *i*	$Pe_{Hk,i}$	Adimensional
Número Biot de transferencia de calor en la capa *k*, del volumen *i*	$Bi_{Hk,i}$	Adimensional
Coeficiente de transferencia de calor interfacial en la capa *k*, del volumen *i*	$h_{Hk,i}$	kW/(m^2.K)
Difusividad térmica en la capa *k*, del volumen *i*	$\alpha_{k,i}$	m^2/s
Coeficiente volumétrico de transferencia de calor en la capa *k*, del volumen *i*	$U_{VAk,i}$	kW/(m^3.K)

El hecho de usar kW y no W, tiene que ver con que los valores numéricos de estas variables, estén entre 1000 y 0,1, tal como lo establecen las reglas del SI. El uso básico para los números adimensionales, tales como *Sh*, *Sc*, St, *Pe*, *Bi*, *Nu* y *Pr*, es para comparar dos fuerzas impulsoras, una se encuentra en el numerador y la otra en el denominador y para desarrollar correlaciones generalizadas. Esto se estudiará con detalle a partir del Módulos 3. Se entiende como número adimensional para una capa o volumen, como su valor promedio.

La gravedad y el factor de conversión dimensional, se denotan cómo se consigue en la bibliografía tradicional, *g* y g_C, respectivamente (Tabla 1.8). El diámetro interno del secador y el diámetro hidráulico para el caso de lo secadores de cinta transportadora, se designan con *D*, más el subíndice *iD* y *HD*, respectivamente.

Tabla 1.8. Propiedades de la partícula, de lechos de partículas fijos y fluidizados y variables de las ecuaciones del balance de *momentum*.§

Variable	Símbolo	Unidad
Aceleración de la gravedad	g	m^2/s
Factor de conversión dimensional	g_C	$kg \cdot m/(N \cdot s^2)$
Diámetro interno del secador[1]	D_{iD}	m
Diámetro hidráulico del secador[2]	D_{HD}	m
Rugosidad relativa de la cara interna del secador[1]	ε_D	Adimensional
Factor de fricción del gas con las paredes del secador	C_{fG}	Adimensional
Porcentaje másico de la fracción j[*]	$\%P_j$	%
Diámetro promedio de partícula de la fracción j	d_{Pj}	mm o m[**]
Diámetro de partícula promedio	d_P	mm o m[**]
Volumen promedio de las partículas de la fracción j	V_{Pj}	m^3
Volumen promedio total de las partículas	V_P	m^3
Esfericidad de la partícula de la fracción j	Φ_{Pj}	Adimensional
Esfericidad promedio de la partícula	Φ_P	Adimensional
Superficie específica de la partícula de la fracción j	a_{Pj}	m^2/m^3
Superficie específica promedio de la partícula	a_P	m^2/m^3
Superficie proyectada de la partícula de la fracción j	ap_{Pj}	m^2
Superficie proyectada promedio de la partícula	ap_P	m^2
Tiempo de residencia de las partículas de la fracción j en el volumen finito i	$t_{Rj,i}$	s
Tiempo de residencia promedio de las partículas del volumen finito i	t_{Ri}	s
Densidad esqueletal de la partícula de la fracción j	ρ_{ej}	m^3/kg
Densidad esqueletal promedio de la partícula	ρ_e	m^3/kg
Densidad real de la partícula de la fracción j	ρ_{Pj}	m^3/kg
Densidad real promedio de la partícula	ρ_P	m^3/kg

§ A partir del Factor de fricción del gas con las paredes del secador, todas las variables, a excepción de la densidad esqueletal, tienen un componente a la entrada y a la salida de la capa *k*, del volumen finito *i*. En caso de secadores rotatorios y de transporte pneumático, las propiedades de partículas, solo se aplica el volumen finito *i*. En el caso de las propiedades geométricas del sólido, tendrán valores de entrada y salida cuando ocurra encogimiento y se cuente con las correlaciones respectivas, en caso contrario, no se considera dicho fenómeno. [*]Puede ser en base seca o en base húmeda. Las propiedades de las partículas y del lecho se explicarán con detalle en el Módulo 4, de todos tres temas del Programa. [**]Se usa milímetros o micrómetros como unidades de usuario, siguiendo las reglas del SI, de que los valores numéricos estén entre 1000 y 0,1, sin embargo, para cálculos se usará metros.[1]Para el caso de los secadores rotatorios y de transporte pneumático. [2]Para los secadores de cinta transportadora.

Tabla 1.8. Propiedades de la partícula, de lechos de partículas fijos y fluidizados y variables de las ecuaciones del balance de *momentum* (Continuación).§

Variable	Símbolo	Unidad
Velocidad de la partícula de la fracción *j*	v_{Pj}	m/s
Velocidad promedio de la partícula	v_P	m/s
Velocidad lineal del gas	v_G	m/s
Velocidad lineal del gas dentro del lecho[1]	v_{Gv}	m/s
Velocidad de deslizamiento	v_d	m/s
Número de Reynolds de la partícula de la fracción *j*[*]	Re_{Pj}	Adimensional
Número de Reynolds promedio de la partícula	Re_P	Adimensional
Velocidad mínima de fluidización de la fracción *j*	v_{mfj}	m/s
Velocidad mínima de fluidización promedio	v_{mf}	m/s
Número de Reynolds mínimo de fluidización de la partícula de la fracción *j*	Re_{mfj}	Adimensional
Número de Reynolds mínimo de fluidización promedio de la partícula	Re_{mf}	Adimensional
Velocidad terminal de fluidización de la fracción *j*	v_{tj}	m/s
Velocidad terminal de fluidización promedio	v_t	m/s
Número de Reynolds terminal de fluidización de la partícula de la fracción *j*	Re_{tj}	Adimensional
Número de Reynolds mínimo de fluidización promedio de la partícula	Re_t	Adimensional
Número de Arquímedes de la fracción *j*	Ar_j	Adimensional
Número de Arquímedes promedio	Ar	Adimensional
Factor de fricción de las partículas de la fracción *j*	C_{fPj}	Adimensional
Factor de fricción promedio de las partículas	C_{fP}	Adimensional
Coeficiente de arrastre de las partículas de la fracción *j*	C_{Dj}	Adimensional
Coeficiente de arrastre promedio	C_D	Adimensional
Densidad aparente de la capa *k*, del volumen finito *i*	$\rho_{Bk,i}$	m^3/kg
Porosidad volumétrica de la capa *k*, del volumen finito *i*	$\varepsilon_{Vk,i}$	Adimensional
Altura de la capa *k*, del volumen finito *i*	$z_{k,i}$	m
Altura total del lecho, del volumen finito *i*	Z_i	m
Caída de presión de la capa *k*, del volumen finito *i*	$\Delta P_{zk,i}$	kPa

§Todas las propiedades y variables, hasta el coeficiente de arrastre promedio inclusive, tienen un valor de entrada y salida a la capa *k*, del volumen finito *i*. Todas las referencias a la capa *k* y el volumen finito *i*, solo aplican para secadores de cinta transportadora. Para los secadores de transporte pneumático y rotatorios, solo aplica el volumen finito *i*. [*]Algunos autores usan la velocidad de la partícula y otros, la velocidad de deslizamiento, para el cálculo de este adimensional. [1]Es la velocidad a través de los espacios vacíos que deja el lecho, o el sólido retenido, dentro del secador, para el caso de los secadores rotatorios.

La letra griega ε, con el subíndice D, denota la rugosidad relativa de la cara interna del secador (Tabla 1.8). Todas las propiedades de las partículas a granel, pueden calcularse y venir expresadas en términos de sus fracciones granulométricas y de su valor ponderado en torno a dichas fracciones, en una capa y/o en un volumen finito.

El factor de fricción se denota con C_f y al estar referido al gas, con las paredes del secador, se denota con el subíndice G. Un número j como subíndice, denotará la fracción de tamaño de partícula, a la que corresponda una propiedad determinada, mientras que la ausencia de este número, indicará que es el promedio ponderado de dicha propiedad. De esta forma, en la Tabla 1.8, se encuentra la denominación de las propiedades de partículas, tanto para una fracción como para la totalidad de las fracciones. El porcentaje en peso de cada fracción de denota con $\%P$, el diámetro, el volumen, la esfericidad, la superficie específica, la superficie proyectada, el tiempo de residencia y las densidades esqueletal y real, de la partícula, se denotan por d_P, V_P, Φ_P, a_P, ap_P, t_R, ρ_e y ρ_P, respectivamente.

La velocidad de la partícula, la velocidad del gas y la velocidad de deslizamiento, se designan con v_P, v_G y v_d, respectivamente, agregando una v como subíndice, cuando la velocidad del gas se refiera a la que tiene, cuando circula a través de los espacios vacíos en el lecho. La velocidad mínima de fluidización y la terminal se designan con v_{mf} y v_t, respectivamente, siendo los números de Reynolds de la partícula (Re_P) mínimo de fluidización y terminal, denotados con los subíndices mf y t, respectivamente; el número de Arquímedes, por otro lado, se denota con Ar, el coeficiente de fricción para la partícula, se denota con el subíndice P, y el coeficiente de arrastre se denota con C_D. La densidad aparente, la porosidad, la altura de capa y la altura total del lecho (para el caso de los secadores de transporte pneumático), y la caída de presión de la capa, se denotan con ρ_b, ε_V, z, Z, ΔP_z, respectivamente (Tabla 1.8).

En la Tabla 1.9 se presentan las variables operativas, de diseño y de desempeño, de secadores. La longitud y la caída de presión del secador, se denotan con L y ΔP, respectivamente, con el subíndice D. La entrada de sólidos al secador, se puede denotar también como alimentación F, y la salida de producto P.

El secado de partículas sólida con una corriente de gas, inevitablemente generará transporte de las fracciones más pequeñas, en especial, al estar secas, y esto, en una simulación rigurosa, no se puede pasar por alto. Para el caso del secador rotatorio, la corriente de gas, arrastra los finos, a expensas del producto principal P_1, hasta el ciclón, para generar la salida de finos, del sistema P_2, y el polvillo que aún sigue siendo arrastrado por el gas, quedan retenidos en el filtro de salida, siendo recuperado regularmente como polvillo P_3 (ver Tabla 1.9). Los secadores de

transporte pneumático en cambio, por secar en ellos partículas más finas, tienen la salida de producto principal P_1, directo en el ciclón, siendo el polvillo retirado en el filtro de salida, como P_2.

Tabla 1.9. Variables operativas, de diseño y de desempeño, de secadores.

Variable	Símbolo	Unidad
Longitud del secador	L_D	m
Caída de presión en el secador	ΔP_D	kPa
Alimentación (bh)[*]	F	kg/s
Producto total (bh)[**]	P	Kg/s
Producto principal (bh)	P_1	kg/s
Finos o polvillo[1] (bh)	P_2	kg/s
Polvillo o material pegado a la cinta[2] (bh)	P_3	kg/s
Se cumple que $P = P_1 + P_2 + P_3$ (Ecuación 24) y solo para secadores de transporte pneumático $P = P_1 + P_2$ (Ecuación 25)		
Humedad de la alimentación (bh)[***]	$\%x_F$	%
Humedad del producto principal (bh)[†]	$\%x_{P1}$	%
Humedad de los finos o polvillo[1] (bh)	$\%x_{P2}$	%
Humedad del polvillo o material pegado a la cinta[2] (bh)	$\%x_{P3}$	%
Tiempo de residencia o de retención total	t_R	s
Retención másica del secador[3] (bh)	m_{SD}	kg
Retención volumétrica del secador[3]	V_{SD}	m^3
Fracción volumétrica retenida[4]	FV	%
Diámetro interno del secador[5]	Di_D	m
Diámetro externo del secador[5]	De_D	m
Longitud de la cinta[2]	L_D	m
Ancho de la cinta[2]	w	m
Superficie de la cinta[2]	A_{CT}	m^2
Espesor del secador[5]	e_D	mm
Espesor del aislamiento térmico del secador[5]	e_{AD}	mm
Espesor de la cubierta del aislamiento térmico del secador[5]	e_{CAD}	mm
Área transversal interna del secador[5]	Ai_D	m^2
Volumen interno del secador[5]	Vi_D	m^3

[*]Igual a S_{eD}. [**]Igual a S_{sD}. [***]Igual a $\%x_{eD}$. [†]Igual a $\%x_{sD}$. [1]Para secadores de transporte pneumático. [2]Para secadores de cinta transportadora. [3]La retención es la cantidad de material dentro del secador, en estado estacionario en cualquier momento. [4]Con respecto al volumen del secador. [5]Principalmente para los secadores rotatorios y de transporte pneumático. Las unidades en mm, tiene que ver con que los valores numéricos de estas variables, estén entre 1000 y 0,1, tal como lo establecen las reglas del SI.

El secado en secadores de cinta transportadora, genera un polvillo P_3 que sale despedido, debido a la fluidización, principalmente en las etapas finales, a expensas del producto principal P_1, teniendo a su vez, otra corriente de salida, representada

por el material que queda pegado a la cinta y que se retira con cepillos de forma continua P_2. Todas estas corrientes tienen una humedad promedio que se muestra en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9. Variables operativas, de diseño y de desempeño, de secadores (continuación).

Variable	Símbolo	Unidad
Capacidad del secador[1]	*Cap*	t/h
Recirculación de aire[2,3] (bh)	*%Rec*	%
Agua removida porcentual	$\%A_{Rem}$	%
Eficacia térmica	η_H	Adimensional
Calor para calentar en aire de salida	ΔQ_L	kW
Calor perdido	ΔQ_P	kW
Calor aportado por el calentador	ΔQ_H	kW
Calor aprovechado con la recirculación	ΔQ_R	kW
Fracción de calor desperdiciado[3]	*%FCD*	%
Fracción de calor perdido[4]	*%FCP*	%
Fracción de calor aprovechado en la recirculación[5]	*%FCA*	%
Conductividad térmica del material de construcción del secador	λ_D	kW/(m.K)
Conductividad térmica del aislamiento térmico del secador	λ_{AD}	kW/(m.K)
Conductividad térmica de la cubierta protectora del aislamiento térmico del secador	λ_{CAD}	kW/(m.K)
Velocidad de rotación[6]	ω	r/s
Ángulo de inclinación del secador[6]	s	rad
Carga de la retención por unidad de área[7]	*Load*	kg/m^2
Humedad absoluta en la zona de mezcla[7]	Y_M	kg/kg
Humedad relativa en la zona de mezcla[7]	HR_M	%

bh: base húmeda. La unidad r, es revoluciones. [1]Las unidades presentadas son las de usuario, las que se encuentran en las especificaciones comerciales de secadores, aunque son aceptadas para el SI, dentro del secador se calculan en kg/s. [2]Para secadores de cinta transportadora. [3]Con respecto al aire de salida en términos másicos. [3]Razón porcentual $\Delta Q_L/\Delta Q_H$. [4]Razón porcentual $\Delta Q_P/\Delta Q_H$. [5]Razón porcentual del calor del gas de recirculación, con respecto al calor del gas de salida del lecho (solo para secadores de cinta transportadora). [6]Solo aplica para secadores rotatorios. [7]Solo aplica para secadores de cinta transportadora. La humedad absoluta viene dada por kilogramos de agua sobre kilogramos de aire seco.

El material dentro del secador, ocupa un espacio en estado estacionario, conocido como retención volumétrica, denotado por V_{SD}, cuya masa se conoce como retención másica m_{SD}, y que, en función del volumen interno del secador, es conocido como fracción volumétrica *FV* (Tabla 1.9). Dicha retención puede ser retirada del secador en un tiempo llamado, tiempo de residencia o retención t_R. Las

dimensiones del secador, tales como diámetro interno, diámetro externo, área interna, volumen interno, espesor, así como los espesores del aislamiento térmico y de la cubierta del aislamiento se denotan con Di_D, De_D, Ai_D, Vi_D, e_D, e_{AD}, e_{CAD}, respectivamente. La capacidad de evaporación de agua, que suele ser la referencia usada por los fabricantes para la comercialización de secadores, se denota con *Cap*, el porcentaje de recirculación de aire y el porcentaje de agua removida, se denotan con *%Rec* y $\%A_{Rem}$, respectivamente.

Siguiendo con la Tabla 1.9, la eficacia térmica, que es la razón porcentual del calor necesario para evaporar el agua eliminada, en relación al calor aportado por el calentador, se denota con η_H. Las transferencias de calor, se denotan con ΔQ, teniendo como subíndice, *L*, para el referido al calor necesario para calentar el aire de salida (calor desaprovechado y que escapa con el aire de salida); *P*, para el perdido al ambiente; *H*, para el aportado por el calentador y *R*, para el aprovechado en la recirculación. %*FCD*, %*FCP* y %*FCA*, representan las fracciones porcentuales de calor desperdiciado (asociado con ΔQ_L), perdido y aprovechado en la recirculación, respectivamente. Las dos primeras fracciones, se calculan como la razón porcentual de ΔQ_L y ΔQ_P, respectivamente, en relación con el calor aportado por el calentador de gas de secado, y el último, como la razón porcentual del calor del gas de recirculación, entre el calor de salida del gas del lecho, y es exclusivo para secadores de cinta transportadora.

La conductividad térmica se denota con λ, y un subíndice, indica el material al que corresponda, el acero del secador, el aislamiento térmico o la cubierta metálica del aislamiento. Las variables operativas del secador rotatorio (Tabla 1.9), velocidad de rotación y ángulo de inclinación se denotan con *w* y *s*, respectivamente, y las variables del secador de cinta transportadora, que tienen que ver con la operatividad del equipo, carga del material sobre la cinta, humedad absoluta y humedad relativa del aire en la zona de mezcla, se denotan como *Load*, Y_M, y HR_M, respectivamente. La carga *Load*, puede estar referida al volumen finito *i*, en cuyo caso, se pone *i* como subíndice.

En las tablas, de la 1.10 a la 1.17, se presenta la notación de las variables operativas de los sistemas de secado estudiados en el Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales.

En la Tabla 1.10, se presentan las variables operativas de los sistemas de secado, relacionadas con los flujos de sólido. Todos los flujos de sólido se denotan con *S*, siendo *S* sin subíndices la corriente seca que sale de la tolva, pasa por el alimentador y entra al secador. Se contemplan tres posibles productos, con sus respectivos flujos secos, y que se denotan con los subíndices *1*, *2* y *3*.

Tabla 1.10. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (Flujos másicos del sólido).

Variable	Símbolo	Unidad
Flujo másico de sólido seco, hasta la entrada del secador	S	kg/s
Flujo másico de sólido seco, como producto principal	S_1	kg/s
Flujo másico de sólido seco, como producto finos*	S_2	kg/s
Flujo másico de sólido seco, como producto polvillo**	S_3	kg/s
Se cumple que $S = S_1 + S_2 + S_3$ (Ecuación 26)		
Flujo másico de sólido de salida de la tolva	S_{sB}	kg/s
Flujo másico de sólido de entrada al alimentador	S_{eF}	kg/s
Flujo másico de sólido de salida del alimentador	S_{sF}	kg/s
Flujo másico de sólido de entrada al secador	S_{eD}	kg/s
Igualmente, $F = S_{eD}$ (Ecuación 27)		
Flujo másico total de salida de sólido del secador	S_{sD}	kg/s
Flujo másico de sólido de salida del secador, como producto principal	S_{s1D}	kg/s
Flujo másico de finos de salida del secador*	S_{s2D}	kg/s
Flujo másico de polvillo de salida del secador**	S_{s3D}	kg/s
Se cumple que $S_{sD} = S_{s1D} + S_{s2D} + S_{s3D}$ (Ecuación 28)		
Flujo másico de sólido de entrada al ciclón	S_{eS}	kg/s
Flujo másico de finos de salida del ciclón	S_{s1S}	kg/s
Flujo másico de polvillos de salida del ciclón	S_{s2S}	kg/s
Flujo másico total de salida de sólidos del ciclón	S_{sS}	kg/s
Se cumple que $S_{s2D} + S_{s3D} = S_{eS}$ (Ecuación 29) y $S_{sS} = S_{s1S} + S_{s2S}$ (Ecuación 30)		
Flujo másico de polvillos de entrada al filtro	S_{eFF}	kg/s
Flujo másico de polvillos de salida del filtro	S_{sFF}	kg/s
Igualmente, para secadores rotatorios, $P_1 = S_{s1D}$ (Ecuación 31), $P_2 = S_{s1S}$ (Ecuación 32), y $P_3 = S_{sFF}$ (Ecuación 33); para secadores de cinta transportadora, $P_1 = S_{s1D}$ (Ecuación 34), $P_2 = S_{s2D}$ (Ecuación 35), y $P_3 = S_{s3D}$ (Ecuación 36) y para secadores de transporte pneumático, $P_1 = S_{s1S}$ (Ecuación 37), y $P_2 = S_{sFF}$ (Ecuación 38);		

S, S_1, S_2, S_3, vienen en unidades de kilogramos de sólido seco entre segundos, el resto, viene en unidades de kilogramos de sólido húmedo, entre segundos. *En el caso de secadores de cinta transportadora, esta corriente corresponde a finos y polvillo, que son transportados por la corriente de gas y caen al piso, sobre todo en las etapas donde el sólido está más seco y, en el caso de secadores de transporte pneumático, sería el polvillo que sale en el filtro bolsa. **Para secadores de cinta transportadora, es el producto que queda pegado a la cinta y se limpia continuamente con cepillos. No tiene equivalencia en los secadores de transporte pneumático.

S_1, sería el producto principal para los tres secadores, que, en el caso del secador de transporte pneumático, sale por el ciclón. S_2, para el sistema del secador rotatorio, es el producto que sale por el ciclón, y que se consideran los finos, para el secador de cinta transportadora, serían los finos y polvillo que salen transportados por la corriente de gas y que caen al piso, para luego ser recogidos y, para el sistema de secador de transporte pneumático, es el material que sale en el filtro bolsa y corresponde al polvillo. S_3, es el polvillo, que salen por el filtro bolsa del sistema del secador rotatorio y, para el secador de transporte pneumático, es el material pegado a la cinta y que se limpia de forma continua con un cepillo. S_3, No tiene equivalencia en el sistema del secador de transporte pneumático (ver Tabla 1.10).

Para la notación de las corrientes de flujo másico total o húmedo (Tabla 1.10), se usa el subíndice, *e* o *s*, en función si es la entrada o salida a o desde un equipo, respetivamente; se usan como subíndices letras en mayúscula, que denotan el equipo correspondiente, *B*, para la tolva de alimentación; *F*, para el alimentador; *D*, para el secador; *S*, para el ciclón y *FF*, para el filtro bolsa. La corriente de alimentación al secador, puede ser denotada igualmente con *F*, y los productos con *P*. Se hay varias salidas de sólido, se denota con un número en el subíndice, antes de la notación del equipo.

En la Tabla 1.11, se presentan la notación para los flujos másicos de gas, los cuales, se designan con *G*, tanto para flujos en base seca como para aquellos en base húmeda. *G*, denota el gas seco de entrada y salida del secador, para el caso de secadores de cinta transportadora, así como para la entrada y salida del sistema, en el caso de los sistemas de secador rotatorio y transporte pneumático. Para el caso específico del secador de cinta transportadora, *GS*, denota las corrientes internas de gas, en base seca, que incluyen el gas de secado con subíndice *D*, el de recirculación, con subíndice *R*, y el de salida del lecho, con subíndice *sL*. Esto para diferenciarlos de los flujos totales. Las entradas y salidas a y desde los equipos por donde circula el aire, así como la notación de dichos equipos, es la misma que para la Tabla 1.10 (*D*, *S* y *FF*), añadiendo *K1*, para el soplador de entrada; *H*, para el calentador y *K2*, para el soplador de salida.

En la Tabla 1.12, se presentan, humedades porcentuales en base húmeda para las corrientes de sólidos, de los sistemas de secado, las cuales se denotan con *%x*. Todas las humedades presentadas, tienen su correspondencia en base seca, con lo cual, la notación cambiaría de *%x*, a *X* (la tabla para esta última variable, no se presenta, ya que es completamente equivalente a la de humedad en base húmeda).

Como subíndice, en la Tabla 1.12, se indica si es entrada o salida a o desde un equipo, con *e* y *s*, respectivamente, siendo los equipos indicados igualmente en el subíndice con una *B*, para la tolva; *F*, alimentador; *D*, secador; *S*, ciclón y *FF*, filtro

bolsa, así mismo, un número indica si hay más de una salida de sólidos. Una sola *F* como subíndice, indica humedad de alimentación, que es la entrada de sólido al secador y una sola *P*, significa producto, la cual, unida a un número, indica que es uno de los productos sólidos que sale del secador.

Tabla 1.11. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (Flujos másicos del gas).

Variable	Símbolo	Unidad
Flujo másico de gas seco[1]	G	kg/s
Flujo másico de gas seco de secado[*,2]	GS_D	kg/s
Flujo másico de gas seco de recirculación[*]	GS_R	kg/s
Se cumple que $GS_D = GS_R + G$ (Ecuación 39), en secadores de cinta transportadora		
Flujo másico de gas de entrada al soplador de entrada	G_{eK1}	kg/s
Flujo másico de gas de salida del soplador de entrada	G_{sK1}	kg/s
Flujo másico de entrada de gas al calentador	G_{eH}	kg/s
Flujo másico de salida de gas del calentador	G_{sH}	kg/s
Flujo másico de entrada de gas al secador	G_{eD}	kg/s
Se cumple qué[**] $G_{eD} = G_{eK1} = G_{sK1} = G_{eH} = G_{sH}$ (Ecuación 40)		
Flujo másico de gas de secado[*,3]	G_D	kg/s
Flujo másico de gas de recirculación[*]	G_R	kg/s
Flujo másico de gas de salida del lecho[*]	G_{sL}	kg/s
Flujo másico de salida de gas del secador	G_{sD}	kg/s
Para secadores de cinta transportadora se cumple qué $G_D = G_{eD} + G_R$ (Ecuación 41) y $G_{sL} = G_R + G_{sD}$ (Ecuación 42)		
Flujo másico de gas de entrada al ciclón	G_{eS}	kg/s
Flujo másico de gas de salida del ciclón	G_{sS}	kg/s
Flujo másico de gas de entrada al filtro	G_{eFF}	kg/s
Flujo másico de gas de salida del filtro	G_{sFF}	kg/s
Flujo másico de gas de entrada al compresor de salida	G_{eK2}	kg/s
Flujo másico de gas de salida del compresor de salida	G_{sK2}	kg/s

Los flujos másicos indicados como de gas seco, tienen unidades de kilogramos de aire seco sobre segundo y el resto, kilogramos de aire húmedo entre segundos. [*]Solo para secadores de cinta transportadora. Para los flujos de gas seco de entrada y salida, se usa *G*. [**]Para sistemas de secado de transporte pneumático y rotatorios con calentamiento indirecto del gas de secado. [1]Aplica para los sistemas de secado de transporte pneumático, y rotatorio, y no varía desde la entrada del soplador de entrada *K1*, hasta la salida del soplador de salida *K2*. También se usa para el flujo de gas seco de entrada y salida del gabinete en donde de forma compacta, están los elementos del secador de cinta transportadora.[2]Es el mismo flujo de gas seco, de entrada y salida del lecho, igualmente para secadores de cinta transportadora. Se divide equitativamente en los volúmenes finitos *V*, y para este caso, se pone el valor de *i*, como subíndice. [3]También es el flujo de gas de entrada al lecho G_{eL}, para secadores de cinta transportadora.

Tabla 1.12. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (humedades porcentuales en base húmeda de sólidos).

Variable	**Símbolo**	**Unidad**
Humedad del sólido de entrada a la tolva	$\%x_{eB}$	%
Humedad del sólido de salida de la tolva	$\%x_{sB}$	%
Humedad del sólido de entrada al alimentador	$\%x_{eF}$	%
Humedad del sólido de salida del alimentador	$\%x_{sF}$	%
Humedad del sólido de entrada al secador	$\%x_{eD}$	%
Normalmente se cumple qué* $\%x_{eB} = \%x_{sB} = \%x_{eF} = \%x_{sF} = \%x_{eD}$ (Ecuación 43). Igualmente se cumple que, $\%x_F = \%x_{eD}$ (Ecuación 44)		
Humedad del sólido de salida del secador, como producto principal	$\%x_{s1D}$	%
Para secadores rotatorios y de cinta transportadora, la humedad del producto principal, $\%x_{P1} = \%x_{s1D}$ (Ecuación 45)		
Humedad de finos de salida del secador[**]	$\%x_{s2D}$	%
Igualmente, para secadores rotatorios y de cinta transportadora, la humedad del producto secundario, $\%x_{P2} = \%x_{s2D}$ (Ecuación 46)		
Humedad del polvillo de salida del secador[***]	$\%x_{s3D}$	%
Igualmente, para secadores rotatorios y de cinta transportadora, la humedad del tercer producto, $\%x_{P3} = \%x_{s3D}$ (Ecuación 47)		
Humedad ponderada de sólido de salida del secador	$\%x_{sD}$	%
Humedad del sólido de entrada al ciclón	$\%x_{eS}$	%
Humedad de finos de salida del ciclón	$\%x_{s1S}$	%
Para secadores de transporte pneumático, $\%x_{P1} = \%x_{s1S}$ (Ecuación 48) y para secadores rotatorios $\%x_{P2} = \%x_{s1S}$ (Ecuación 49)		
Humedad de polvillos de salida del ciclón	$\%x_{s2S}$	%
Humedad ponderada de salida de sólidos del ciclón	$\%x_{sS}$	%
Humedad de polvillos de entrada al filtro	$\%x_{eFF}$	%
Humedad de polvillos de salida del filtro	$\%x_{sFF}$	%
Para secadores de transporte pneumático, $\%x_{P2} = \%x_{sFF}$ (Ecuación 50), y para secadores rotatorios $\%x_{P3} = \%x_{sFF}$ (Ecuación 51)		

Todas estas humedades, tienen su correspondencia en base seca, y para su notación en base seca, se cambia *%x*, por *X*. [*]Según el tiempo de residencia en la tolva, pudiera haber cierta evaporación de agua, y según el funcionamiento del alimentador, pudiera haber cierta eliminación de agua por prensado. [**] Para secadores de cinta transportadora, esta corriente corresponde a finos y polvillo, que son transportados por la corriente de gas y caen al piso, sobre todo en las etapas donde el sólido está más seco y, en el caso de secadores de transporte pneumático, sería el polvillo que se transporta, y se retiene en el filtro bolsa, y sale de este equipo. [***]En el caso de secadores de cinta transportadora, es el producto que queda pegado a la cinta y se limpia continuamente con cepillos. No tiene equivalencia en los secadores de transporte pneumático.

En la Tabla 1.13, se presenta la notación, para las humedades absolutas de las corrientes de gas, las cuales se denotan con *Y*. Todas las humedades absolutas

presentadas, tienen su correspondencia en humedad coloquial, con lo cual, la notación cambiaría de *Y* a *y,* por lo cual solo se presenta la tabla de *Y*.

Tabla 1.13. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (Humedades absolutas del gas).

Variable	Símbolo	Unidad
Humedad absoluta de gas de entrada al soplador de entrada	Y_{eK1}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de salida del soplador de entrada	Y_{sK1}	kg/kg
Humedad absoluta de entrada de gas al calentador	Y_{eH}	kg/kg
Humedad absoluta de salida de gas del calentador	Y_{sH}	kg/kg
Humedad absoluta de entrada de gas al secador	Y_{eD}	kg/kg
Se cumple qué[*] $Y_{eK1} = Y_{sK1} = Y_{eH} = Y_{sH} = Y_{eD}$ (Ecuación 52)		
Humedad absoluta del gas de secado[**]	Y_D	kg/kg
Humedad absoluta de gas de recirculación[**]	Y_R	kg/kg
Humedad absoluta de gas en la zona de mezcla[**]	Y_M	kg/kg
Humedad absoluta de salida de gas del secador	Y_{sD}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de entrada al ciclón	Y_{eS}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de salida del ciclón	Y_{sS}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de entrada al filtro bolsa	Y_{eFF}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de salida del filtro bolsa	Y_{sFF}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de entrada al compresor de salida	Y_{eK2}	kg/kg
Humedad absoluta de gas de salida del compresor de salida	Y_{sK2}	kg/kg

Humedades absolutas en kilogramos de vapor de agua entre kilogramos de aire seco. [*]Para secadores con calentamiento indirecto. [**]Solo para secadores de cinta transportadora.

Para designar la humedad absoluta, en la Tabla 1.13, de un gas de entrada a un equipo, se usa el subíndice *e* y la salida *s*, respectivamente, seguido de la notación del equipo. Tal como se viene haciendo con anterioridad, para el soplador de entrada, se usa la notación, *K1*; el calentador, *H*; el secador, *D*; el ciclón, *S*; el filtro bolsa, *FF* y el soplador de salida, *K2*.

En la Tabla 1.14, se presentan las temperaturas de las corrientes, las cuales se denotan con *T*.

Tabla 1.14. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (Temperaturas).

Variable	Símbolo	Unidad
Temperatura de gas de entrada al soplador de entrada	T_{GeK1}	ºC
Temperatura de gas de salida del soplador de entrada	T_{GsK1}	ºC
Temperatura de entrada de gas al calentador	T_{GeH}	ºC
Temperatura de salida de gas del calentador	T_{GsH}	ºC
Temperatura del sólido de entrada a la tolva	T_{SeB}	ºC
Temperatura del sólido de salida de la tolva	T_{SsB}	ºC
Temperatura del sólido de entrada al alimentador	T_{SeF}	ºC
Temperatura del sólido de salida del alimentador	T_{SsF}	ºC
Temperatura de entrada de gas al secador	T_{GeD}	ºC
Temperatura de entrada del solido al secador	T_{SeD}	ºC
Temperatura de gas de secado*	T_D	ºC
Temperatura del gas de recirculación*	T_R	ºC
Temperatura del gas en la zona de mezcla*	T_M	ºC
Temperatura de salida de gas del secador	T_{GsD}	ºC
Temperatura del sólido de salida del secador	T_{SsD}	ºC
Temperatura de gas de entrada al ciclón	T_{GeS}	ºC
Temperatura del sólido de entrada al ciclón	T_{SeS}	ºC
Temperatura de gas de salida del ciclón	T_{GsS}	ºC
Temperatura de finos de salida del ciclón	T_{Ss1S}	ºC
Temperatura de polvillos de salida del ciclón	T_{Ss2S}	ºC
Temperatura de gas de entrada al filtro	T_{GeFF}	ºC
Temperatura de polvillos de entrada al filtro	T_{SeFF}	ºC
Temperatura de gas de salida del filtro	T_{GsFF}	ºC
Temperatura de polvillos de salida del filtro	T_{SsFF}	ºC
Temperatura de gas de entrada al compresor de salida	T_{GeK2}	ºC
Temperatura de gas de salida del compresor de salida	T_{GsK2}	ºC

*Solo para secadores de cinta transportadora.

Las temperaturas que tienen como subíndice, *G*, en la Tabla 1.14, denotan correspondencia a una corriente de gas y *S*, a una corriendo de sólido. Una entrada a un equipo, se denota con *e* y con *s*, la salida. La notación de los equipos, por donde circulan estas corrientes se señala en el subíndice y son las mismas que ya se han mencionado (Tolva, *B*; Alimentador, *F*; Soplador de entrada, *K1*; Calentador de aire, *H*; Secador, *D*; Ciclón, *S*; Filtro bolas, *FF* y soplador de salida, *K2*). Los subíndices *D*, *R* y *M*, denotan la humedad de los gases de secado, recirculación y zona de mezcla, respectivamente, solo para secadores de cinta transportadora.

En la Tabla 1.15, se presenta la notación de las humedades relativas del gas, durante el recorrido por los sistemas de secado, y se denota con *HR*.

Tabla 1.15. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (Humedades relativas del gas).

Variable	Símbolo	Unidad
Humedad relativa de gas de entrada al soplador de entrada	HR_{eK1}	%
Humedad relativa de gas de salida del soplador de entrada	HR_{sK1}	%
		%
Humedad relativa de entrada de gas al calentador	HR_{eH}	%
Humedad relativa de salida de gas del calentador[1]	HR_{sH}	%
Humedad relativa de entrada de gas al secador[1]	HR_{eD}	%
Humedad relativa de gas de recirculación[*]	HR_{R}	%
Humedad relativa de gas de secado[*]	HR_{D}	%
Humedad relativa de gas en la zona de mezcla[*]	HR_{M}	%
Humedad relativa de salida de gas del secador	HR_{sD}	%
Humedad relativa de gas de entrada al ciclón	HR_{eS}	%
Humedad relativa de gas de salida del ciclón	HR_{sS}	%
Humedad relativa de gas de entrada al filtro	HR_{eFF}	%
Humedad relativa de gas de salida del filtro	HR_{sFF}	%
Humedad relativa de gas de entrada al compresor de salida	HR_{eK2}	%
Humedad relativa de gas de salida del compresor de salida	HR_{sK2}	%

[*]Solo para secadores de cinta transportadora. [1]Por encima de 100 ºC, estas humedades relativas son indeterminadas, y se reportan << 0,1%.

Al igual que para el resto de variables operativas del gas, para designar la humedad relativa de un gas de entrada a un equipo, se usa el subíndice *e* y la salida *s*. Los equipos se señalan, igualmente en el subíndice, teniendo para el soplador de entrada, *K1*; el calentador, *H*; el secador, *D*; el ciclón, *S*; el filtro bolsa, *FF* y el soplador de salida *K2*. Los subíndices *D*, *R* y *M*, denotan la humedad de los gases de secado, recirculación y zona de mezcla, respectivamente, solo para secadores de cinta transportadora (todo esto se presenta en la Tabla 1.15).

La notación de los caudales de gas, se presenta en la Tabla 1.16, y se denotan con *Q*. Al igual que para el resto de las variables operativas, del sistema, relacionadas con el gas, la entrada a un equipo, se denota con el subíndice *e*, y la salida con *s*, y dichos equipos se denotan en el mismo subíndice, para el soplador de entrada *K1*,

para el calentador *H*, para el secador *D*, para el ciclón *S*, para el filtro bolsa, *FF*, y para el soplador de salida *K2*. Los subíndices *D*, *R* y *M*, denotan los gases de secado, recirculación y zona de mezcla, respectivamente, solo para secadores de cinta transportadora.

Tabla 1.16. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (caudales actuales del gas[§]).

Variable	Símbolo	Unidad
Caudal de gas de entrada al soplador de entrada	Q_{eK1}	m^3/s
Caudal de gas de salida del soplador de entrada	Q_{sK1}	m^3/s
		m^3/s
Caudal de entrada de gas al calentador	Q_{eH}	m^3/s
Caudal de salida de gas del calentador	Q_{sH}	m^3/s
Caudal de entrada de gas al secador	Q_{eD}	m^3/s
Caudal del gas de secado[*]	Q_D	m^3/s
Caudal de gas de recirculación[*]	Q_R	m^3/s
Caudal de gas de mezcla[*]	Q_M	m^3/s
Caudal de salida de gas del secador	Q_{sD}	m^3/s
Caudal de gas de entrada al ciclón	Q_{eS}	m^3/s
Caudal de gas de salida del ciclón	Q_{sS}	m^3/s
Caudal de gas de entrada al filtro	Q_{eFF}	m^3/s
Caudal de gas de salida del filtro	Q_{sFF}	m^3/s
Caudal de gas de entrada al compresor de salida	Q_{eK2}	m^3/s
Caudal de gas de salida del compresor de salida	Q_{sK2}	m^3/s

§Los caudales actuales se pueden llevar a las condiciones estándar de fabricantes para especificar los equipos auxiliares, en cuyo caso, los caudales actuales se denominarán caudales estándar, siendo la notación *SQ*, pero la unidad se mantiene en m^3/s, siguiendo las reglas del SI. *Solo para secadores de cinta transportadora.

En la Tabla 1.17, se presentan las caídas de presión y presiones de los sistemas, denotadas con ΔP y P, respectivamente.

Para las presiones, siguiendo con la Tabla 1.17, los puntos ubicados a las entradas de los equipos se denotan con el subíndice *e* y las salidas con *s*. Para los equipos, se sigue la misma notación anterior, en donde se señala en el subíndice, el soplador de entrada con *K1*, el calentador con *H*, el secador con *D*, el ciclón con *S*, el filtro bolsa con *FF*, y el soplador de salida con *K2*. Para las caídas de presión en los ductos, se pone la notación de los dos equipos que unen dichos ductos, separados con -, en el subíndice, antecedido por una *T*; para la caída de presión de un equipo, se pone la notación del equipo antes señalada en el subíndice, y para la caída de presión del lecho, para el caso de los secadores de cinta transportadora, se pone *L*.

Tabla 1.17. Variables operativas y de diseño de los sistemas de secado (presiones y caídas de presión).

Variable	Símbolo	Unidad
Presión de succión del compresor de entrada	P_{eK1}	kPa
Presión de descarga del compresor de entrada	P_{sK1}	kPa
Caída de presión en el ducto entre el compresor de entrada y el calentador	ΔP_{TK1-H}	kPa
Presión a la entrada del calentador	P_{eH}	kPa
Caída de presión en el calentador	ΔP_{H}	kPa
Presión a la salida del calentador	P_{sH}	kPa
Caída de presión en el ducto entre el calentador y el secador	ΔP_{TH-D}	kPa
Presión a la entrada del secador	P_{eD}	kPa
Caída de presión en el secador	ΔP_{D}	kPa
Caída de presión en el lecho*	ΔP_{L}	kPa
Presión a la salida del secador	P_{sD}	kPa
Caída de presión en el ducto entre el secador y el ciclón	ΔP_{TD-S}	kPa
Presión a la entrada del ciclón	P_{eS}	kPa
Caída de presión en el ciclón	ΔP_{S}	kPa
Presión a la salida del ciclón	P_{sS}	kPa
Caída de presión en el ducto entre el ciclón y el filtro	ΔP_{TS-FF}	kPa
Presión a la entrada del filtro	P_{eFF}	kPa
Caída de presión en el filtro	ΔP_{FF}	kPa
Presión a la salida del filtro	P_{sFF}	kPa
Caída de presión en el ducto entre el filtro y el compresor de salida	ΔP_{TFF-K2}	kPa
Presión de succión del compresor de salida	P_{eK2}	kPa
Presión de descarga del compresor de salida	P_{sK2}	kPa

*Solo para secadores de cinta transportadora.

La notación de las variables de diseño de equipos asociados y ductos, se presenta en la Tabla 1.18. Sea cual sea el equipo, las variables que tienen que ver con el tiempo, se denotan con t, las que tienen que ver con un volumen, con V, las que tienen que ver con masa, con m, densidad aparente, ρ_b, longitud, espesor, diámetro interno y, área interna, con L, e, Di, y Ai, respectivamente.

utilizando un guion (-), que separa la notación de dos equipos, antecediendo, una T, por ejemplo, cualquier variable relacionada con el ducto que separa el compresor de entrada del calentador, se denotaría con el subíndice $TK1\text{-}H$. En caso de la potencia nominal o requerida, se antecede una N o una R, respectivamente en el subíndice, al resto de la información contenida en éste. Al igual que en explicaciones

previas, entradas y salidas se denotan con *e* y *s*, como subíndice. **Para designar cualquier variable promedio, se usará el subíndice *prom*, después de designar el equipo o tubería correspondiente**.

Tabla 1.18. Variables de diseño de equipos asociados y ductos.

Variable	Símbolo	Unidad
Tiempo de operación del sistema de secado al día	t_{OPd}	h/d
Tolva de alimentación		
Capacidad másica de la tolva de alimentación	m_B	kg
Densidad aparente del sólido en la tolva	ρ_{bSB}	kg/m^3
Capacidad volumétrica de la tolva	V_B	m^3
Tiempo de vaciado de la tolva	t_{VB}	s
Alimentador		
Capacidad del alimentador	F	kg/s
Longitud del alimentador	L_F	m
Diámetro interno del alimentador	Di_F	m
Volumen del alimentador	V_F	m^3
Densidad aparente del sólido en el alimentador	ρ_{bSF}	kg/m^3
Potencia requerida por el alimentador	Pw_{RF}	kW
Eficiencia del alimentador	η_F	%
Potencia nominal del alimentador	Pw_{NF}	kW
Consumo eléctrico diario requerido por el alimentador	EE_F	kWh/d
Compresor de entrada		
Flujo másico del compresor de entrada	G_{K1}	kg/s
Caudal estándar del compresor de entrada	SQ_{K1}	m^3/s
Relación de compresión del compresor de entrada	RC_{K1}	Adimensional
Potencia requerida por el compresor de entrada	Pw_{RK1}	kW
Eficiencia del compresor de entrada	η_{K1}	%
Potencia nominal del compresor de entrada	Pw_{NK1}	kW
Consumo eléctrico diario requerido por el compresor de entrada	EE_{K1}	kWh/d
Calentador de aire		
Calor transferido por el calentador al gas	ΔQ_H	kW
Eficiencia del calentador	η_H	%
Consumo másico de combustible del calentador	C_H	kg/s
Densidad del combustible a la temperatura de almacenamiento	ρ_{CH}	kg/m^3
Consumo volumétrico de combustible del calentador	Q_{CH}	m^3/s

Tabla 1.18. Variables de diseño de equipos asociados y ductos (continuación).

Variable	Símbolo	Unidad
Tuberías		
Rugosidad relativa de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$\varepsilon_{T1\text{-}2}$	Adimensional
Factor de fricción de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$C_{fGT1\text{-}2}$	Adimensional
Longitud de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$L_{T1\text{-}2}$	m
Longitud equivalente de accesorios de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$L_{eAT1\text{-}2}$	m
Diámetro interno de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$Di_{T1\text{-}2}$	m
Velocidad lineal del gas a la entrada de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$v_{GeT1\text{-}2}$	m/s
Velocidad lineal del gas a la salida de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$v_{GsT1\text{-}2}$	m/s
Caída de presión en la tubería por la fricción del equipo 1 al equipo 2	$\Delta P_{T1\text{-}2F}$	kPa
Porosidad volumétrica del lecho transportado en la tubería* del equipo 1 al equipo 2	$\varepsilon_{VT1\text{-}2}$	Adimensional
Caída de presión por el transporte de sólidos* del equipo 1 al equipo 2	$\Delta P_{T1\text{-}2S}$	kPa
Caída de presión total del equipo 1 al equipo 2	$\Delta P_{T1\text{-}2}$	kPa
Espesor de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$e_{T1\text{-}2}$	mm
Espesor del aislamiento de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$e_{AT1\text{-}2}$	mm
Espesor de la cubierta metálica del aislamiento de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$e_{CAT1\text{-}2}$	mm
Conductividad térmica de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$\lambda_{T1\text{-}2}$	kW/(m.K)
Conductividad térmica del aislamiento de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$\lambda_{AT1\text{-}2}$	kW/(m.K)
Conductividad térmica de la cubierta del aislamiento de la tubería del equipo 1 al equipo 2	$\lambda_{CAT1\text{-}2}$	kW/(m.K)
Pérdida de calor en la tubería del equipo 1 al equipo 2	$\Delta Q_{T1\text{-}2}$	kW

El equipo 1 y 2, referido a las variables de diseño de las tuberías pueden ser una de estas 4 opciones: compresor de entrada-calentador de aire *K1-H*, calentador de aire-secador *H-D*, secador-ciclón *D-S*, ciclón-filtro *S-FF*, filtro-compresor de salida *FF-K2* (solo aplica para los secadores de transporte pneumático y rotatorios, ya que el de cinta transportadora es un equipo compacto). *Solo para las tuberías de salida del secador y entrada al ciclón y de salida del ciclón y entrada al filtro, que son las que pueden tener partículas arrastradas.

Tabla 1.18. Variables de diseño de equipos asociados y ductos (continuación).

Variable	Símbolo	Unidad
Ciclón		
Caída de presión en el ciclón	ΔP_S	kPa
Pérdida de calor en el ciclón	ΔQ_S	kW
Área interna de la entrada al ciclón	Ai_{eS}	m^2
Velocidad del gas en la entrada del ciclón	v_{GeS}	m/s
Velocidad del gas de salida del ciclón	v_{GsS}	m/s
Ancho de la boquilla de entrada al ciclón[1]	Bc	m
Alto de la boquilla de entrada al ciclón[1]	Hc	m
Diámetro interno de la salida de gases del ciclón[1]	De	m
Diámetro interno del ciclón[1]	Dc	m
Altura de la sección superior cilíndrica del ciclón[1]	Lc	m
Descenso de la tubería de salida del ciclón por debajo de la boquilla de alimentación[1]	Sc	m
Altura de la sección inferior cónica del ciclón[1]	Zc	m
Diámetro interno de la salida inferior de sólidos del ciclón[1]	Jc	m
Filtro bolsa		
Caída de presión del filtro limpio	ΔP_{FFC}	kPa
Caída de presión del filtro sucio	ΔP_{FFD}	kPa
Capacidad de retención de polvillo	m_{P3FF}	kg
Tiempo de ensuciamiento del filtro	t_{FF}	s
Compresor de salida		
Flujo másico del compresor de salida	G_{K2}	kg/s
Caudal estándar del compresor de salida	SQ_{K2}	m^3/s
Relación de compresión del compresor de salida	RC_{K2}	Adimensional
Potencia requerida por el compresor de salida	Pw_{RK2}	kW
Eficiencia del compresor de salida	η_{K2}	%
Potencia nominal del compresor de entrada	Pw_{NK2}	kW
Consumo eléctrico diario requerido por el compreso de entrada	EE_{K2}	kWh/d

[1]Ver la Figura 1.30.

Siguiendo con la Tabla 1.18, Para denotar rugosidad relativa, se usa ε; velocidad lineal, v; caída de presión, ΔP; consumo eléctrico, EE; potencia, Pw; diferencia de calor, ΔQ; caudal, Q; caudal estándar, SQ; factor de fricción, C_f; conductividad térmica, λ; flujo másico del alimentador, F; relación de compresión, RC; flujo másico total de gas, G; eficiencia, η. Los subíndices para denotar ductos, se expresan Las variables para el dimensionamiento del ciclón, Bc, Hc, De, Dc, Lc, Sc, Zc, Jc, expresadas en la Tabla 1.18, pueden ser vistas, en la Figura 1.30, donde se puede apreciar, el componente de este equipo, al cual representan. Los subíndices para

equipos vienen dados por *B,* para la tolva de alimentación; *F,* para el alimentador; *H,* para el calentador; *K1*, para el soplador de entrada; *D*, para el secador; *S*, para el ciclón; *FF*, para el filtro bolsa y *K2*, para el soplador de salida.

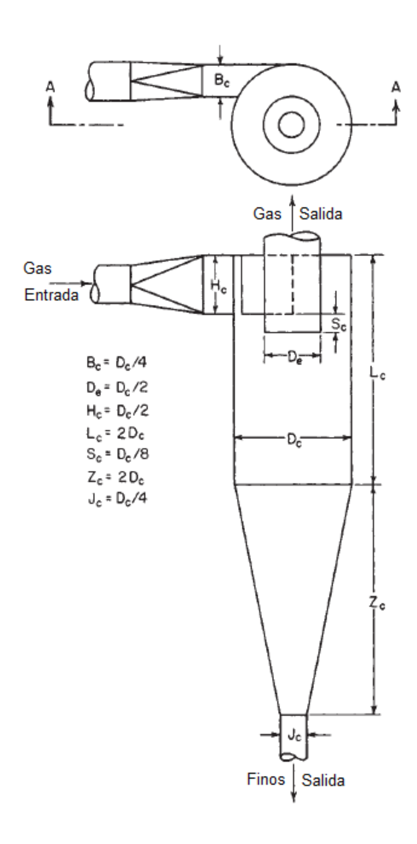


Figura 1.30. Detalle del ciclón (Adaptado del Perry, 1997).

Algunas de las variables, presentes en las tablas, de la 1.9 a la 1.18, para el sistema de secado de transporte pneumático, se muestra en la Figura 1.31, a manera de ejemplo ilustrativo (**intente hacer una explicación del dibujo y además, hacer un dibujo equivalente para el resto de los sistemas del Programa y compártalo con el Profesor**).

utilizando un guion (-), que separa la notación de dos equipos, antecediendo, una *T*, por ejemplo, cualquier variable relacionada con el ducto que separa el compresor de entrada del calentador, se denotaría con el subíndice *TK1-H*. En caso de la potencia nominal o requerida, se antecede una *N* o una *R*, respectivamente en el subíndice, al resto de la información contenida en éste. Al igual que en explicaciones previas, entradas y salidas se denotan con *e* y *s*, como subíndice. **Para designar cualquier variable promedio, se usará el subíndice *prom*, después de designar el equipo o tubería correspondiente**.

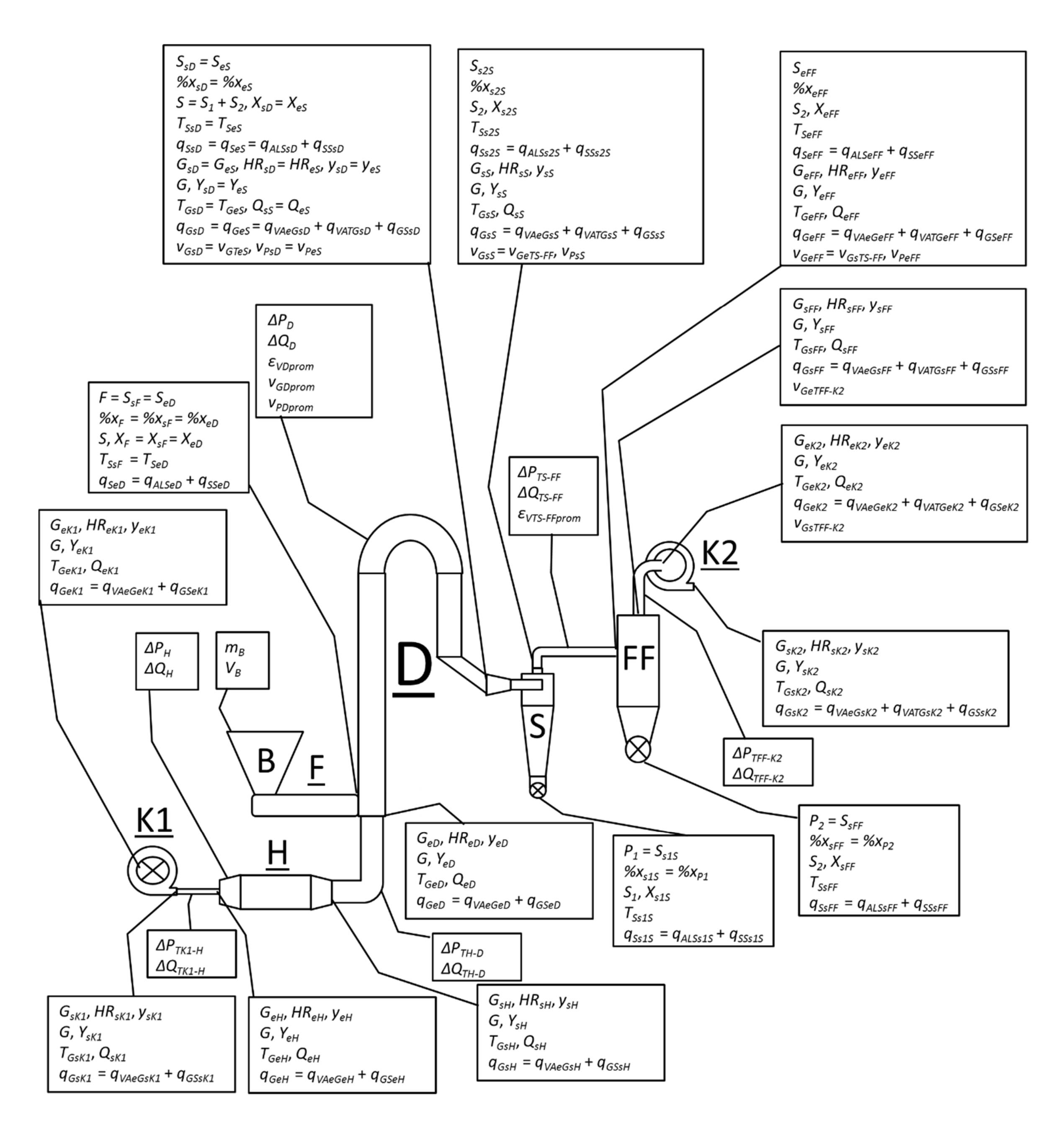


Figura 1.31. Sistema de secado de transporte pneumático, con el detalle de algunas de las variables operacionales del sistema.

En la Tabla 1.19, se presenta la notación de variables de elevadores y retención en secadores rotatorios. Las longitudes se denotan con *L*, a excepción de la longitud avanzada por una cascada, que se denota con l_x, la cual se explica en la Figura 1.32. Variables de tiempo, velocidad lineal, masa y volumen, se denotan con *t*, *v*, *m*, y *V*, respectivamente. Ángulo de inclinación y velocidad angular, *s*, y *ω*, respectivamente, radio interno se denota con r_{iD}, y número de cascadas, n_{Cas}.

Tabla 1.19. Variables de elevadores y retención en secadores rotatorios.

Variable	Símbolo	Unidad
Velocidad de rotación	ω	r/s
Ángulo de inclinación del secador	s	rad
Radio interno del secador	r_{iD}	m
Longitud del secador	L_D	m
Longitud de los volúmenes finitos	L_V	m
Velocidad lineal de entrada del gas al secador	v_{GeD}	m/s
Velocidad lineal de salida del gas al secador	v_{GsD}	m/s
Velocidad promedio del gas en el secador	v_{GD}	m/s
Velocidad lineal de entrada del gas al volumen finito *i*	v_{GeVi}	m/s
Velocidad lineal de salida del gas del volumen finito *i*	v_{GsVi}	m/s
Velocidad promedio del gas en el volumen finito *i*	v_{GVi}	m/s
Tiempo de residencia o de retención total	t_R	s
Tiempo de residencia en el volumen finito *i*	t_{RVi}	s
Retención másica del secador (bh)	m_{SD}	kg
Retención másica en el volumen finito *i* (bh)	m_{SVi}	kg
Densidad aparente del sólido en el secador	ρ_{bD}	kg/m^3
Densidad aparente del sólido en el volumen finito *i*	ρ_{bVi}	kg/m^3
Retención volumétrica del secador	V_{SD}	m^3
Retención volumétrica en el volumen finito *i*	V_{SVi}	m^3
Número de cascadas	n_{Cas}	Adimensional
Tiempo promedio de permanencia del sólido en el elevador[1]	t_e	s
Tiempo promedio de caída del sólido desde del elevador[1]	t_c	s
Longitud avanzada por una cascada[1]	l_x	m

[1]Kamke y Wilson (1986a y b) asumen que estas variables son constantes en todas las cascadas del secador rotatorio, pero, dado que estas variables dependen del diámetro de la partícula, de la densidad real del sólido, de la densidad, la viscosidad, y de la velocidad lineal del gas, y dado de que todas estas variables varían a lo largo del secador, se asume que se alcanza mayor precisión y rigurosidad, especificando estas variables para cada cascada, cuando se lleve a cabo la simulación. Hay que tomar en cuenta además que, un mismo secador, puede tener diferentes tipos de elevadores a lo largo de su longitud.

Los tiempos relacionados con el movimiento radial del sólido dentro del secador rotatorio, de permanencia en el elevador y de caída, se denotan con t_e y t_c, respectivamente. En la Figura 1.33 se muestra la ilustración de estas variables. Los ángulos relacionados con la geometría de los elevadores vacíos y con sólido, presentado en la Tabla 1.19, y denotados con las letras griegas, Θ, Φ, α, β, γ, ψ, se ilustran, en la figuras 1.34A y B.

Tabla 1.19. Variables de elevadores y retención en secadores rotatorios (continuación).

Variable	Símbolo	Unidad
Ángulo subtendido por la punta del elevador con la horizontal, en el centro del tambor	Θ	rad
Ángulo formado por la superficie libre de los sólidos en el elevador con la horizontal	Φ	rad
Coeficiente dinámico de fricción de un gránulo a medida que se desliza por la superficie de gránulos similares	C_{fDss}	Adimensional
Relación de fuerzas gravitacionales y centrípetas	RGC	Adimensional
Radio hasta el labio de un elevador	r_e	m
Longitud del elevador	L_e	m
Longitud del labio del elevador	L_{le}	m
Ángulo entre el elevador y la tangente al tambor	α	rad
Ángulo formado en el centro del tambor entre el borde del labio del elevador y el radio que pasa por el punto de intersección entre el elevador y su labio	β	rad
Ángulo formado entre el elevador y el radio que pasa por el punto de intersección entre éste y su labio	γ	rad
Ángulo formado entre el elevador y su labio	ψ	rad

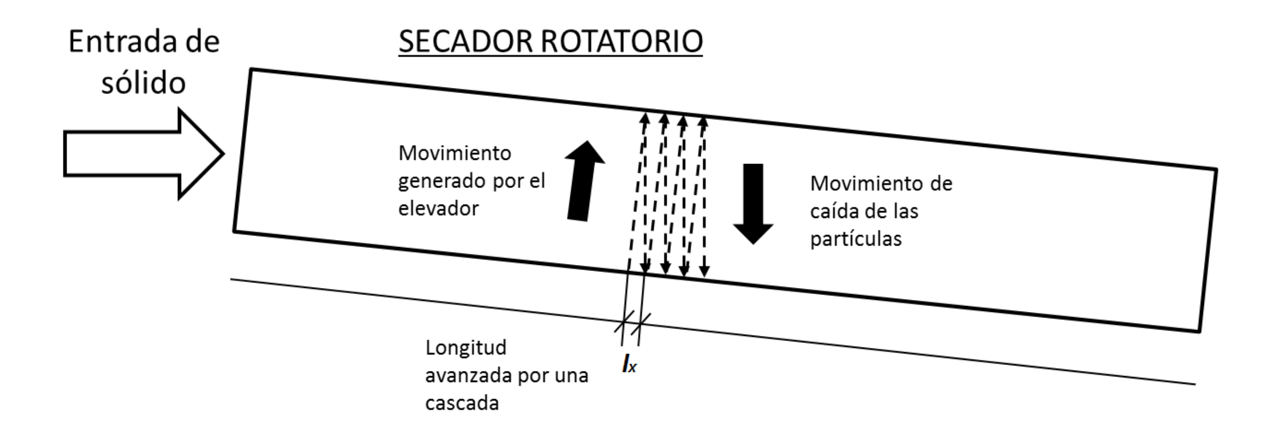


Figura 1.32. Detalle del concepto de cascadas, dentro de un secador rotatorio.

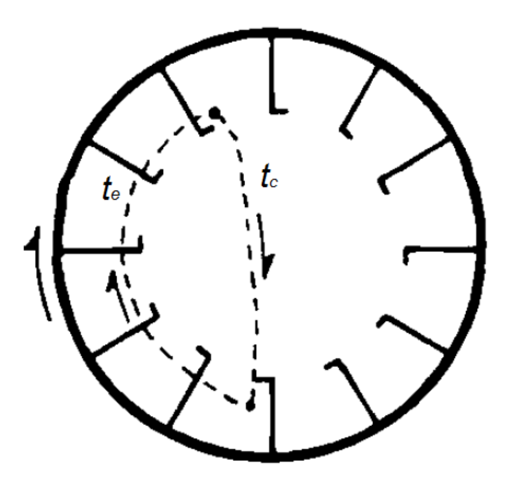


Figura 1.33. Ilustración del tiempo de permanencia del sólido en el elevador (t_e) y del sólido al caer del elevador (t_c) (Kamke y Wilson, 1986a).

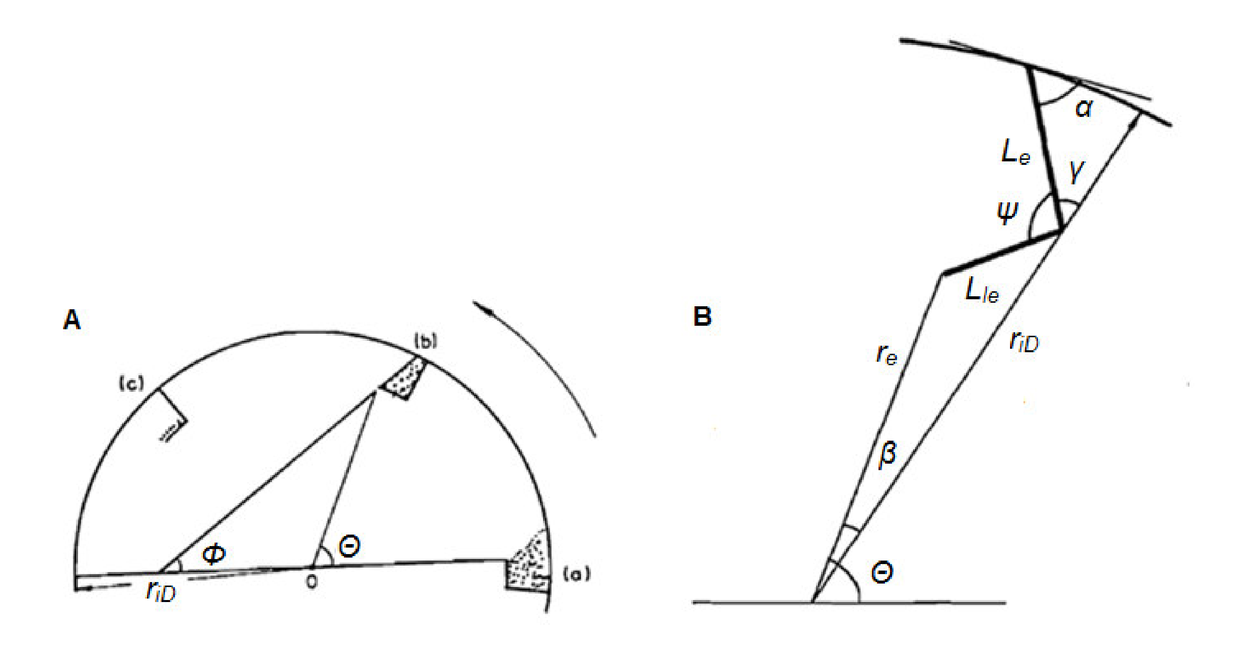


Figura 1.34. Corte transversal de un elevador típico en tres condiciones diferentes de vaciado (A); Geometría de un elevador genérico (B) (Adaptado de Baker, 1988).

La notación de las variables usadas en los métodos de solución numérica, de los sistemas de ecuaciones, que son la base de la simulación rigurosa, se presentan en la Tabla 1.20. En la Tabla 1.21, se presentan las variables utilizadas para la evaluación económica de un sistema de secado, lo cual se usará principalmente para la selección del mejor sistema, una vez que la vía técnica sea agotada.

Siguiendo con la Tabla 1.20, el residuo y la constante proporcional, para la ecuación de los estimados para cada iteración *h*, se denotan con *r* y C_r, respectivamente,

poniendo como subíndice la variable respectiva, por ejemplo, para la humedad absoluta, de salida del gas, r_{Ys} y C_{rYs}, respectivamente, poniendo a su vez, como subíndice, la capa, el volumen y la iteración a la cual correspondan.

Tabla 1.20. Variables relacionadas con el método iterativo de resolución del sistema de ecuaciones.

Variable	Símbolo	Unidad
Iteración	h	adimensional
Número total de iteraciones	N_h	Adimensional
Estimado inicial de la temperatura de salida del sólido de la capa *k* del volumen *i*[1]	$T_{Ssk,ih=0}$	ºC
Estimado inicial de la temperatura de salida del gas de la capa *k* del volumen *i*[1]	$T_{Gsk,ih=0}$	ºC
Estimado inicial de la humedad (bs) de sólido de salida de la capa *k* del volumen *i*[1]	$X_{sk,ih=0}$	kg/kg*
Estimado inicial de la humedad absoluta del gas de salida de la capa *k* del volumen *i*[1]	$Y_{sk,ih=0}$	kg/kg**
Tiempo de cómputo	t_{Comp}	s
Tolerancia para la variable ***XX*** de la capa *k* del volumen *i*[1]	$TOL\underline{\boldsymbol{XX}}_{k,i}$	ºC o kg/kg***
Residuo para la variable ***XX*** de la capa *k* del volumen *i*[1] de la iteración *h*	$r_{\underline{XX}k,ih=h}$	ºC o kg/kg***
Constante proporcional para la variable ***XX*** de la capa *k* del volumen *i*[1] de la iteración *h*	$C_{r\underline{XX}k,ih=h}$	Adimensional

bs: Base seca. ***XX***, denota alguna de las cuatro variables de salida, a determinar, por el método de solución numérica iterativo, las cuales pueden ser, la temperatura de salida del sólido, la temperatura de salida del gas, la humedad en base seca de salida del sólido o la humedad absoluta de salida del gas. Para cualquiera de las cuatro variables a determinar (***XX***), se cumple que, el estimado de la iteración $h + 1$ se calcula con la siguiente ecuación $\underline{\boldsymbol{XX}}_{k,ih=h+1} = \underline{\boldsymbol{XX}}_{k.ih=h} + C_{r\underline{XX}k,ih=h} \cdot r_{\underline{XX}k,ih=h}$ (Ecuación 53). *kilogramos de agua sobre kilogramos de sólido seco. **kilogramos de agua sobre kilogramos de gas seco. ***Depende de a cuál de las cuatro variables (***XX***), se refiera. [1]Para los secadores de transporte pneumático y rotatorios, no se contempla la división de capas, solo de volúmenes finitos.

Las variables que se iteran son, la temperatura de salida del sólido, T_{Ss}, la temperatura de salida del gas, T_{Gs}, la humedad en base seca del sólido de salida, X_s, y la humedad absoluta del gas de salida, Y_s, para las distintas capas y volúmenes finitos, que se denotan con los subíndices k,i, respectivamente, como se explicó con anterioridad. Además de esto se le añade el número de iteración h. Los estimados iniciales de las variables de salida, de la capa k y del volumen finito i, se denotan según lo establecido, añadiendo el subíndice $h=0$. Por otro lado, el número total de iteraciones y el tiempo de cómputo, se denotan con N_h y t_{Comp}, respectivamente. La tolerancia, se denota con TOL, junto a la variable respectiva, por ejemplo, la tolerancia para la humedad en base seca, de salida del sólido será $TOLX_s$.

Tabla 1.21. Variables relacionadas con la estimación de costos y la evaluación económica.

Variable	Símbolo	Unidad
Tiempo del análisis económico	t_A	a
Precio FOB sistema de secado	P_{FOB}	USD
Costo de transporte marítimo desde país de fabricación hasta puerto nacional	$C_{TranspM}$	USD
Costo de nacionalización	C_{Nac}	USD
Costo de transporte terrestre desde puerto nacional hasta fábrica	$C_{TranspF}$	USD
Costo de instalación	C_{Inst}	USD
Crédito	*Cred*	USD
Costo de la materia prima húmeda	C_{Matp}	USD
Precio del producto secado	P_{ProdS}	USD
Costo de energía eléctrica	C_{EE}	USD
Costo de combustible	C_{Comb}	USD
Costo de mantenimiento	C_{Mant}	USD
Costos operativos fijos	C_{OpF}	USD
Costos operativos variables	C_{OpV}	USD
Costos de personal	C_{per}	USD
Pago del crédito	*PCred*	USD
Pago de intereses	*iCred*	USD
Amortización	*Am*	USD
Depreciación	*Dep*	USD
Valor de salvamento	*VS*	USD
Inflación	*inf*	%
Tiempo de vida útil	t_{VU}	a
Egresos totales	E_{Tot}	USD
Ganancias brutas	*GB*	USD
Impuesto sobre la renta	*ISLR*	USD
Impuestos municipales	*ISM*	USD
Ganancias netas	*GN*	USD
Flujo neto de caja	*FNC*	USD
Retorno de la inversión	*ROI*	%
Valor presente neto	*VPN*	USD
Tasa interna de retorno	*TIR*	%

FOB: Free on board, o franco a bordo, quiere decir, el equipo puesto en el puerto para su transporte por vía marítima.

Los costos y precios, mostrados en la Tabla 1.21, se denotan con *C* y *P*, respectivamente, identificando en el subíndice, las primeras letras del ítem al que se refieren, por ejemplo, costos de mantenimiento, será C_{Mant}. El tiempo se denota como de costumbre, *t*, y normalmente es en años. Como subíndice se indica si es el tiempo de evaluación del proyecto, *A*, o de la vida útil del sistema, *VU*. El resto de

las variables se denotan con sus siglas o primeras letras en español, a excepción del Retorno de la Inversión, indicador que se identifica más fácilmente por sus siglas en inglés (*ROI*) [§§].

La notación de variables en el área de secado y de la simulación de secadores, no es estándar, varía de autor en autor. Así mismo, algunas de las propiedades mostradas, pueden calcularse con correlaciones, que conlleven más coeficientes y constantes, pero serán definidos, en su momento, en los módulos donde se explique su utilización.

Unidades coloquiales y unidades de ingeniería (transformación)

Las unidades coloquiales son las que se entienden de forma rápida y sin necesidad de una formación técnica en el área, es decir, son de uso común y general en la sociedad. Las unidades de ingeniería, se usan para efectos de cálculos y facilitan los balances de masa y energía, lo que podemos ver por ejemplo, en el caso de los flujos en base seca, los cuales, se mantienen constantes en cualquier punto de un equipo de secado, siendo esto, sumamente útil para los cálculos rigurosos. Las unidades de ingeniería son difíciles de interpretar, por ejemplo, una humedad en base seca de 14 kg/kg (kilogramos de agua entre kilogramos de sólido seco), se podría pensar que es una humedad baja, pero en realidad representa 93,33% de humedad en base húmeda, es decir, cualquier persona no podría entender, o no lo haría tan rápidamente, que el material que presenta esta humedad (de 14 kg/kg), está bastante húmedo. Igualmente, un gas con 0,05 kg/kg de humedad absoluta (kilogramos de agua sobre kilogramos de aire seco), a 105 F, se pudiera pensar que es un gas con baja humedad, pero, en realidad su humedad relativa, está cercana al 100% (ver Figura 1.2).

La importancia de las unidades coloquiales, radica en que el operario puede tomar decisiones rápidas, sin necesidad de hacer cálculos complejos mentales, en la operación de una planta, en especial, en momentos en el que se visualiza, una tendencia en alguna de las variables que definen la calidad del producto, a salirse de control, o en momentos de emergencias. Igualmente, permiten que el proceso de diseño y simulación se lleve a cabo de forma más eficiente, ya que el Ingeniero, es capaz de captar rápidamente si las condiciones establecidas, generan el resultado esperado y, en consecuencia, hará los cambios respectivos para lograr el objetivo, sin que dicho proceso sea tedioso o incómodo, permitiendo además que

[§§] En este módulo se llegará hasta la selección técnica. En el Módulo 10, se explicará la selección en términos económicos. Esto aplica principalmente para técnicas de secado industrial diferentes, que pueden ser aplicadas a la misma materia prima y que no tengan diferencias apreciables en la preselección.

su atención, se centre en los aspectos más importantes de esta actividad, incluyendo la detección de errores de programación.

Por ejemplo, un balance de masa global, para un secador, tiene 8 variables en base húmeda o total (G_{eD}, G_{sD}, S_{eD}, S_{sD}, x_{eD}, x_{sD}, y_{eD} y y_{sD}), pero solo 6 variables en base seca (G, S, X_{eD}, X_{sD}, Y_{eD} y Y_{sD}), aunque, las unidades coloquiales para la humedad del gas, normalmente se expresan en humedad relativa, por cual, harían falta dos variables más (T_{GeD} y T_{GsD}), para definir el balance de masa, en caso de unidades coloquiales[***].

Las humedades del sólido en base seca (unidades de ingeniería), de entrada y salida del secador, se calculan, a partir de unidades coloquiales (humedades en base húmeda), con las siguientes expresiones.

$X_{eD} = \frac{x_{eD}}{(1-x_{eD})}$ (Ecuación 54) y $X_{sD} = \frac{x_{sD}}{(1-x_{sD})}$ (Ecuación 55)

Por otro lado, las humedades del sólido en base húmeda (unidades coloquiales), de entrada y salida del secador, se calculan, a partir de las unidades de ingeniería (humedades en base seca), con las siguientes expresiones.

$x_{eD} = \frac{X_{eD}}{(1+X_{eD})}$ (Ecuación 56) y $x_{sD} = \frac{X_{sD}}{(1+X_{sD})}$ (Ecuación 57)

El flujo másico de sólido en unidades coloquiales, se expresa en flujo total de entrada (S_{eD}) y flujo total de salida (S_{sD}). Para calcular el flujo de sólido seco (S), se pueden usar, cualquiera de las siguientes expresiones.

$S = \frac{S_{eD}}{(1+X_{eD})}$ (Ecuación 58) o $S = \frac{S_{sD}}{(1+X_{sD})}$ (Ecuación 59)

Igualmente, teniendo el flujo másico de sólido seco, los flujos de entrada y salida del secador, pueden ser calculados, con las expresiones siguientes.

$S_{eD} = S \cdot (1 + X_{eD})$ (Ecuación 60) y $S_{sD} = S \cdot (1 + X_{sD})$ (Ecuación 61)

A la presión atmosférica y por debajo de 100 ºC, la humedad absoluta del gas de secado, puede ser calculada puede ser calculada con las ecuaciones 62, 63 y 64.

[***] Normalmente, la humedad relativa no se calcula para el gas de secado, puesto que la mayor parte de los sistemas de secado, trabajan con temperaturas mayores a los 100 ºC. Por encima de 100 ºC, la humedad relativa es indeterminada. Sin embargo, puede ser usada la humedad relativa del gas de entrada al soplador, es decir, la ambiental, si el calentamiento del aire es indirecto, con lo que la humedad absoluta, sería la misma, hasta la entrada del secador, esto, para los secadores rotatorios y de transporte pneumático. Para el secador de cinta transportadora, aplica otro razonamiento, ya que el gas de entrada, se mezcla con una recirculación, antes de convertirse en gas de secado.

$Y = HR \cdot Y^{sat}$ (Ecuación 62)

$Y^{sat} = \frac{0,662 \cdot p^{sat}}{101,325 - p^{sat}}$ ††† (Ecuación 63)

$$p^{sat} = \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73,679 - \frac{7258,2}{273,15+T_G} - 7,3037 \cdot ln(273,15+T_G) + 0,0000041653 \cdot (273,15+T_G)^2}$$ ‡‡‡

(Ecuación 64)

De esta forma, para secadores rotatorios y de transporte pneumático, teniendo las humedades relativas y temperaturas, se puede obtener la expresión, para las humedades del gas en base seca, de entrada (que es igual a la entrada del soplador de entrada, asumiendo, calentamiento indirecto del aire), así como la de salida del secador (siempre y cuando, esté por debajo de 100 ºC).

$$Y_{eD} = Y_{eK1} = HR_{eK1} \cdot \frac{0,662 \cdot \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73,679 - \frac{7258,2}{273,15+T_{GeK1}} - 7,3037 \cdot ln(273,15+T_{GeK1}) + 0,0000041653 \cdot (273,15+T_{GeK1})^2}}{101,325 - \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73,679 - \frac{7258,2}{273,15+T_{GeK1}} - 7,3037 \cdot ln(273,15+T_{GeK1}) + 0,0000041653 \cdot (273,15+T_{GeK1})^2}}$$

(Ecuación 65) y

$$Y_{sD} = HR_{sD} \cdot \frac{0,662 \cdot \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73,679 - \frac{7258,2}{273,15+T_{GsD}} - 7,3037 \cdot ln(273,15+T_{GsD}) + 0,0000041653 \cdot (273,15+T_{GsD})^2}}{101,325 - \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73,679 - \frac{7258,2}{273,15+T_{GsD}} - 7,3037 \cdot ln(273,15+T_{GsD}) + 0,0000041653 \cdot (273,15+T_{GsD})^2}}$$

(Ecuación 66)

En el caso de tener, las humedades del gas en la entrada y la salida del secador, las humedades absolutas correspondientes, vienen dadas por las siguientes expresiones.

$Y_{eD} = \frac{y_{eD}}{(1-y_{eD})}$ (Ecuación 67) y $Y_{sS} = \frac{y_{sD}}{(1-y_{sD})}$ (Ecuación 68)

Para calcular las humedades del gas de entrada y salida del secador, con las humedades absolutas (de ingeniería), se usan las siguientes expresiones.

$y_{eD} = \frac{Y_{eD}}{(1+Y_{eD})}$ (Ecuación 69) y $y_{sD} = \frac{Y_{sD}}{(1+Y_{sD})}$ (Ecuación 70)

El flujo másico de gas en unidades de ingeniería, se puede calcular, a partir del flujo másico total de entrada (G_{eD}) o del flujo másico total de salida (G_{sD}), pudiéndose usar, cualquiera de las siguientes expresiones.

††† Expresión de la psicrometría (Treybal, 2001)

‡‡‡ Expresión adaptada del Perry (1997).

$G = \frac{G_{eD}}{(1+Y_{eD})}$ (Ecuación 71) o $G = \frac{G_{sD}}{(1+Y_{sD})}$ (Ecuación 72)

Finalmente, para calcular, los flujos másicos de gas de entrada y salida del secador, se usan las siguientes expresiones, a partir del flujo en unidades de ingeniería (gas seco).

$G_{eD} = G \cdot (1 + Y_{eD})$ (Ecuación 73) y $G_{sD} = G \cdot (1 + Y_{sD})$ (Ecuación 74)

donde, todas las variables encontradas en estas ecuaciones, fueron previamente descritas en la subsección anterior de **Notación que se usará en el Programa (overview de todo el Programa)**.

A continuación, un ejemplo práctico, permitirá visualizar la aplicación de estos conceptos.

Ejemplo Práctico Nº 4. Establezca las ecuaciones para que su simulador (de un secador con calentamiento indirecto del gas), calcule las variables de entrada del balance de masa, en unidades de ingeniería, tomando en cuenta, que el usuario, ingresará los siguientes datos: (1) Humedad relativa del gas de entrada al soplador de entrada, (2) temperatura del gas de entrada al soplador de entrada, (3) flujo másico total de gas de entrada, (4) humedad en base húmeda del sólido de entrada al secador, y (5) flujo total de sólido de entrada. Use los siguientes datos como ejemplo, 0,8, 25 ºC, 10000 kg/h, 0,75 kg/kg, y100 kg/h, respectivamente.

Datos de entrada en unidades coloquiales y unidades de usuario:

HR_{eK1} = 0,8

T_{GeK1} = 25 ºC

G_{eK1} = G_{eD} = 10 000 kg/h (kilogramos de gas húmedo por hora)

x_{eD} = 0,75 kg/kg (kilogramos de agua entre kilogramos de sólido húmedo)

S_{eD} = 100 kg/h (kilogramos de sólido húmedo por hora)

Transformación de unidades de usuario a Sistema Internacional

Flujo de sólido

Unidades de usuario: kg/h (kilogramos de gas húmedo por hora)

Unidades en Sistema Internacional: kg/s

Factor de proporcionalidad: 1/3600 h/s

Flujo de gas, en unidades de usuario (kg/h): 10 000

Cálculo: 10 000·(1/3600) = 2,78

Flujo de gas, en Sistema Internacional (kg/s): 2,78

Flujo de gas

Unidades de usuario: kg/h (kilogramos de sólido húmedo por hora)

Unidades en Sistema Internacional: kg/s

Factor de proporcionalidad: 1/3600 h/s

Flujo de sólido, en unidades de usuario (kg/h): 100

Cálculo: 100·(1/3600) = 0,0278

Flujo de sólido, en Sistema Internacional (kg/s): 0,0278

Ecuaciones:

$$Y_{eD} = Y_{eK1} = HR_{eK1} \cdot \frac{0{,}662 \cdot \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73{,}679-\frac{7258{,}2}{273{,}15+T_{GeK1}}-7{,}3037 \cdot ln(273{,}15+T_{GeK1})+0{,}0000041653 \cdot (273{,}15+T_{GeK1})^2}}{101{,}325-\left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73{,}679-\frac{7258{,}2}{273{,}15+T_{GeK1}}-7{,}3037 \cdot ln(273{,}15+T_{GeK1})+0{,}0000041653 \cdot (273{,}15+T_{GeK1})^2}}$$

$$G = \frac{G_{eD}}{(1+Y_{eD})}$$

$$X_{eD} = \frac{x_{eD}}{(1-x_{eD})}$$

$$S = \frac{S_{eD}}{(1+X_{eD})}$$

Cálculos:

$$Y_{eD} = 0{,}8 \cdot \frac{0{,}662 \cdot \left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73{,}679-\frac{7258{,}2}{273{,}15+25}-7{,}3037 \cdot ln(273{,}15+25)+0{,}0000041653 \cdot (273{,}15+25)^2}}{101{,}325-\left(\frac{1}{1000}\right) \cdot e^{73{,}679-\frac{7258{,}2}{273{,}15+25}-7{,}3037 \cdot ln(273{,}15+25)+0{,}0000041653 \cdot (273{,}15+25)^2}} = 0{,}017\ 64 \text{ kg/kg}$$

(kilogramos de agua entre kilogramos de aire seco)

$G = \frac{2{,}78}{(1+0{,}01764)} = 2{,}73$ kg/s (kilogramos de gas seco por segundo)

$X_{eD} = \frac{0{,}75}{(1-0{,}75)} = 3$ kg/kg (kilogramos de agua entre kilogramos de sólido seco)

$S = \frac{0{,}0278}{(1+3)}$ = 0,006 94 kg/s (kilogramos de sólido seco por segundo)

<u>Resultados en unidades de ingeniería y Sistema internacional:</u>

Y_{eD} = 0,017 64 kg/kg

G = 2,73 kg/s

X_{eD} = 3 kg/kg

S = 0,006 94 kg/s

Los resultados numéricos que no están correctamente expresados, con la regla de los prefijos, para que dicho valor esté entre 1000 y 0,1, tienen que ver que dentro del simulador, solo hay que tener consistencia dimensional, en las variables utilizadas, para llevar a cabo los cálculos.

En forma de diagrama de flujo, este ejercicio, quedaría de la forma mostrada en la Figura 1.35.

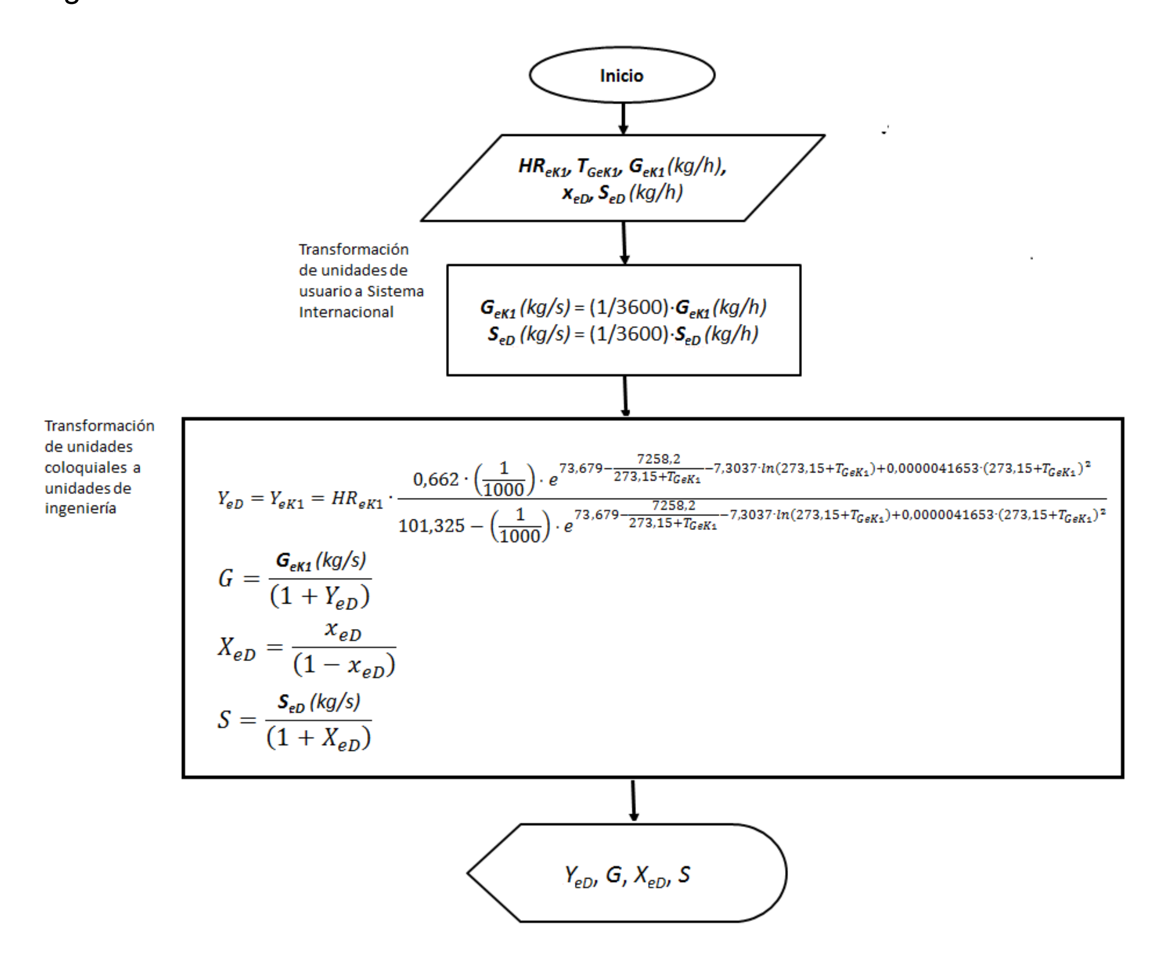


Figura 1.35. Diagrama de flujo del Ejemplo Práctico 4.

La primera forma de representar un simulador, es mediante un diagrama de flujos. Al tener el diagrama de flujos del simulador conforme, se pasa a convertir cada uno de las etapas planteadas, a instrucciones en el software de preferencia.

Otros ejercicios propuestos, pueden encontrarse en la **Guía de Evaluación del Módulo I**.

Dicho todo esto, podemos entonces extraer hasta este punto, de la caja negra que representa para nosotros el simulador, dos módulos de cálculo, para llevar, de unidades coloquiales a unidades de ingeniería, previo a los cálculos propios del simulador, y de unidades de ingeniería a unidades coloquiales, al obtener los resultados. Esto se muestra en la Figura 1.36.

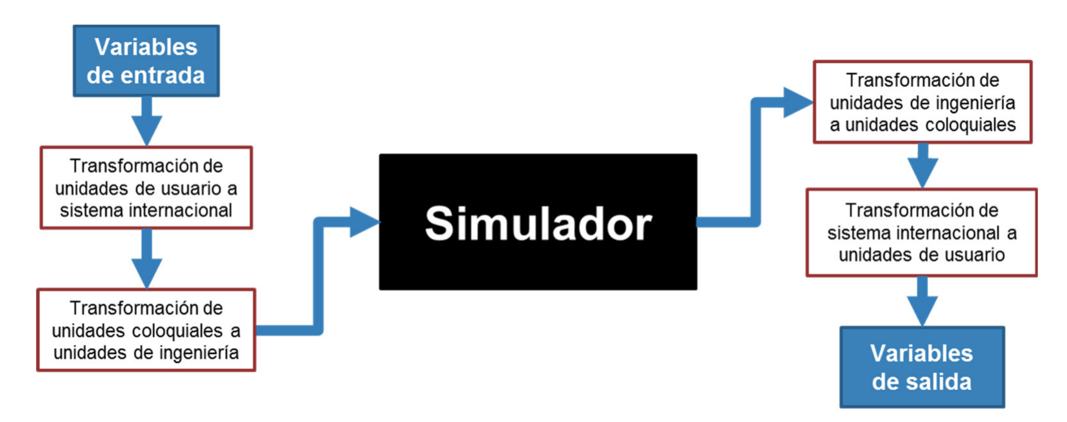


Figura 1.36. Diagrama de bloques inicial de un simulador, incluyendo los módulos de transformación de unidades de usuario a sistema internacional y viceversa y unidades coloquiales a unidades de ingeniería y viceversa.

5. Clasificación y selección secadores industriales

Clasificación de los secadores

Mujumdar (2000), presenta una clasificación muy interesante de los secadores, la cual se presenta a continuación de forma esquemática.

- Según el modo de operación.
  - Por lotes.
  - Continuo (más común en la práctica).
- Según el tipo de suministro de calor.
  - Convección (más común en la práctica), conducción, radiación, campo electromagnético, combinación de varios modos de transferencia de calor.
  - Intermitente o continuo (más común en la práctica).
  - Adiabático y no adiabático.

- Según el estado del material en el secador.
    - Estacionario.
    - En movimiento, agitado, disperso.
- Según la presión de operación.
    - En vacío (más común en la práctica).
    - Atmosférico.
- Según el medio de secado (para transferencia de calor por convección).
    - Aire (más común en la práctica).
    - Vapor sobrecalentado.
    - Gases de combustión.
- Según la temperatura de secado.
    - Por debajo de la temperatura de ebullición del agua (más común en la práctica).
    - Por encima de la temperatura de ebullición del agua.
    - Por debajo del punto de congelación del agua.
- Según el movimiento relativo del gas de secado, con respecto al sólido.
    - Cocorriente.
    - Contracorriente.
    - Flujo cruzado.
- Según el número de etapas.
    - Simple (más común en la práctica).
    - Múltiple.
- Según el tiempo de residencia (para secadores continuos).
    - Corto (menor a un minuto).
    - Intermedio (entre un minuto y una hora).
    - Alto (mayor de una hora).

La clasificación general de los secadores industriales, se basa en la forma en la que se transfiere del calor (convección, conducción y radiación), hacia el material que se quiere secar, y no ha tenido cambios desde su concepción (Kemp y Bahu, 1995; Perry, 1997; Mujumdar, 2006; Brandini *et al*., 2010). De la clasificación general, Perry (1997), define una subclasificación, que tiene que ver, si el material a secar, se queda dentro del secador por un tiempo determinado, llamado tiempo de secado (secadores por lotes), o si se el material transita por el secador, en función de las características y condiciones operativas del secador, a cuyo tiempo de tránsito se le conoce como tiempo de retención o residencia (secadores continuos). De la subclasificación, vienen los tipos, que pueden tener subtipos o combinaciones de la forma como se transfiere el calor (ver Figura 1.37).

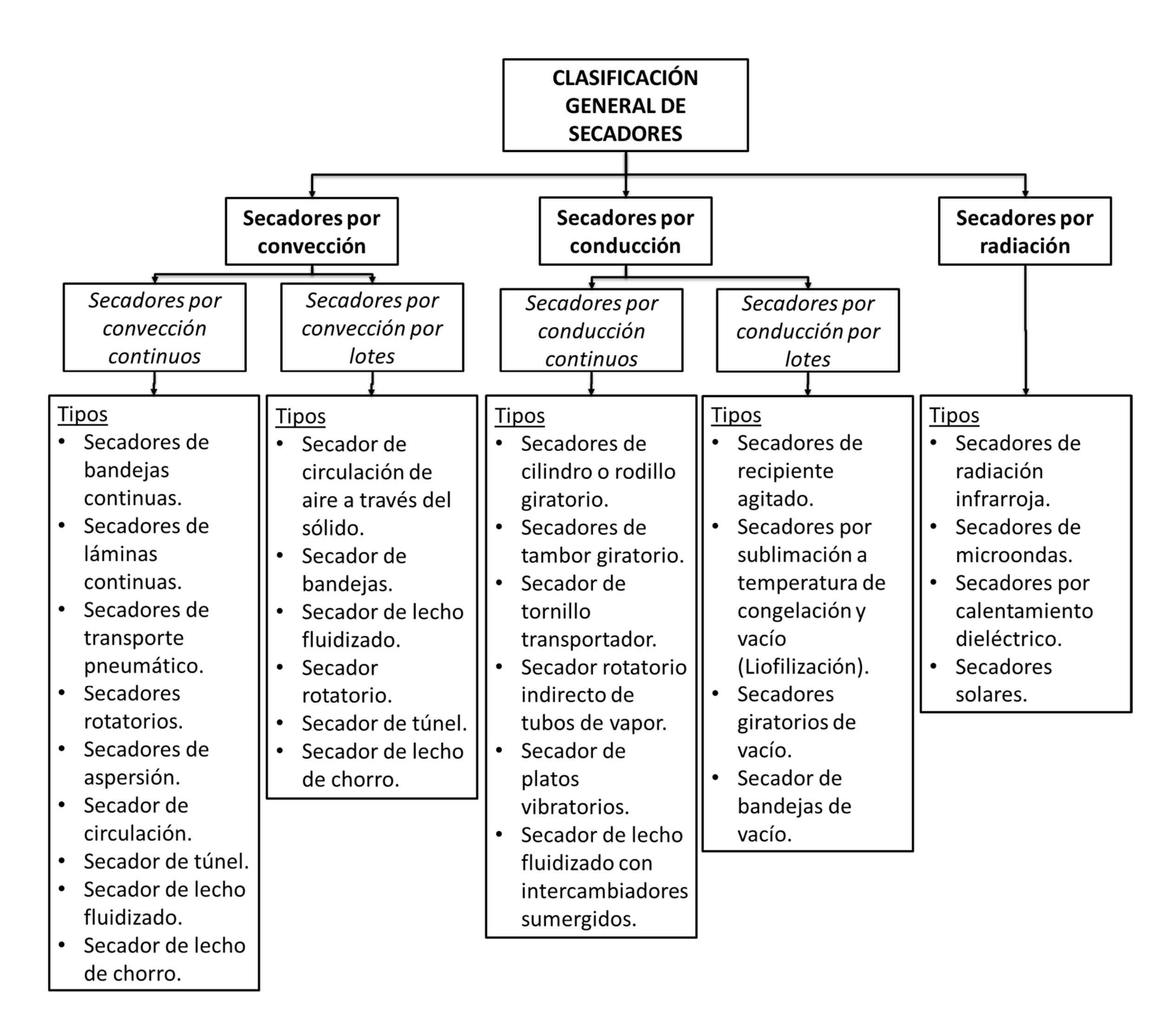


Figura 1.37. Clasificación general de los secadores.

Secadores por convección

La convección es posiblemente la forma más popular de secar partículas, sólidos con forma de hojas, y pastas. También llamados secadores directos, en esta clasificación están los secadores que se analizarán en este **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales.** Su característica principal es que el calor requerido para vaporizar el agua del material, proviene del gas que está en contacto con éste, por lo que es llamado, gas de secado, el cual transfiere su calor al material a secar por convección térmica, y dicho material, transfiere su humedad al seno del gas. Dicho gas puede ser aire caliente, gases de combustión, vapor sobrecalentado e inclusive gases inertes (como N_2), en función de las características adveras o antagónicas del material, o alguno de sus componentes, hacia el oxígeno.

Para temperaturas de gas de secado, por debajo de la temperatura de ebullición del agua, la humedad relativa del gas, pasa a ser un factor limitante en el proceso de secado. Para materiales no sensibles al calor, se estila llevar la temperatura del gas de secado, tan alta como el material de construcción del secador lo permita, pudiendo usar temperaturas de hasta 800 ºC, tal que dicho secador, en especial para aplicaciones continuas, tenga el menor tamaño posible y, por lo tanto, el menor costo. Consumen más combustible por unidad de masa de agua evaporada. En servicios donde el calor que se suministra a través del gas es alto, y las partículas a secar son muy pequeñas, el sistema debe contar con recuperadores de polvillos aguas abajo, lo que encarece la inversión en equipos. Su eficiencia suele aumentar en función del aumento de la temperatura del gas de secado.

Si el sólido presenta un periodo de velocidad constante, su temperatura durante el secado, corresponde a la temperatura de bulbo húmedo del gas de secado, mientras que, al llegar a periodo de velocidad decreciente, su temperatura se acerca, a la temperatura de bulbo seco del gas (esto se explica con más detalles, en Módulo 2). Esto debe ser tomado en cuenta, si el material es sensible al calor. Si el gas de secado fuera vapor sobrecalentado, la temperatura del sólido en el periodo de velocidad constante, sería la de saturación, a la presión de operación. Ejemplos de estos secadores son los secadores rotatorios convencionales, secadores de lecho fluidizado, secadores de aspersión, de cámara de secado, y secadores de transporte pneumático (Perry, 1997; Mujumdar, 2006).

Secadores por convección (directos) continuos

La operación de estos secadores no tiene interrupciones. En la misma medida en que entra alimentación y gas de secado, sale producto y gas enfriado, y con mayor humedad. Se tienen varios tipos:

- ***Secadores de bandejas continuas***. Que pueden ser, cintas metálicas continuas, bandejas vibratorias que utilizan gases calientes, turbo secadores verticales, en donde el gas de secado, circula por encima del sólido. Se recomienda para materiales granulares, que fluyen de forma libre cuando están húmedos, así como para pastas y lodos.
- ***Secadores de láminas continuas***. En donde una hoja continua del material, pasa a través del secador. El gas de secado impacta en una de las caras, en forma de chorro caliente, y propicia la transferencia de calor. Mujumdar (2006), señala que son utilizados en numerosas operaciones de secado industrial que implican un secado rápido de materiales en forma de hojas continuas (por ejemplo, papel higiénico, película fotográfica, papel estucado o recubierto, como el de las

revistas, telas no tejidas y textiles) o láminas relativamente grandes y delgadas (por ejemplo, chapas, madera y alfombras) o incluso lechos de gránulos gruesos (por ejemplo, comida para gatos o perros).

- ***Secadores de transporte pneumático***. El material es transportado por un gas a alta temperatura y alta velocidad, hasta un ciclón colector. Mujumdar (2006), señala que son particularmente útiles para secar productos granulares, cristalinos, pastosos y en polvo, etc. Los secadores flash se utilizan en varias ramas de la química, farmacéutica, cerámica, yeso, madera y minería. Se han estudiado para el secado de bagazo de caña de azúcar (Aralde 1992 y 1993; Montiel, 2018).
- ***Secadores rotatorios***. El material es movido por internos que lo recogen y lo sueltan formando una cortina, mientras el gas de secado, circula a través de dicha cortina. Una inclinación, el arrastre del gas o internos especiales, permiten que el material circule desde la entrada de alimentación, hasta la salida de producto. Son los secadores con mayor versatilidad. Son aplicables a líquidos con recirculación de producto seco, soluciones verdaderas y coloidales, y emulsiones. Ejemplos: soluciones de sales inorgánicas, extractos, leche, sangre, licores de desecho, látex de caucho, etc. Son aplicables a lodos y suspensiones bombeables, con recirculación de producto seco. Ejemplos: lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, concentrados de plomo, etc. Son adecuado para la mayoría de los materiales granulares tipo polvos que fluyen relativamente libre en estado húmedo, tales como precipitados centrifugados, pigmentos, arcilla, cemento, etc. Adecuados para la mayoría de los sólidos granulares (con cierto cuidado en el nivel de abrasión), cristalinos o fibrosos, por ejemplo, rayón básico, cristales de sal, arena, minerales, tiras de patata, caucho sintético, etc. Se ha hecho un extenso estudio para el secado en secador rotatorio, de *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo (Venezuela), a pesar de su leve pegajosidad, obteniendo resultados prometedores, sin recirculación de producto seco (Faneite *et al*., 2013).
- ***Secadores de aspersión***. Se usa para materiales pastosos o líquidos que pueden ser atomizados, bien sea, por un disco centrífugo o por boquilla. Es otro de los secadores más versátiles. Aplicable a líquidos, lechadas, pastas y lodos (para estas dos últimas aplicaciones, se requiere un equipo especial de bombeo para alimentar el atomizador). Dentro de los productos secados por atomización a escala industrial, Mujumdar (2006), señala: (1) la industria química de resina de fenol-

formaldehído, catalizadores, emulsiones de policloruro de vinilo (PVC), aminoácidos, etc.; (2) la industria cerámica de óxido de aluminio, carburos, óxido de hierro, caolín, etc.; (3) colorantes y pigmentos, como amarillo de cromo, colorante alimentario, dióxido de titanio, pigmentos de pintura, etc.; (4) fertilizantes, como nitratos, sales de amonio, fosfatos, etc.; (5) detergentes y agentes tensoactivos, como enzimas detergentes, lejía en polvo, agentes emulsionantes, etc.; (6) la industria alimentaria, de la leche, suero, huevo, proteína de soja, etc.; (7) frutas y verduras, como por ejemplo, plátano, tomate, leche de coco, etc.; (8) carbohidratos, como por ejemplo, glucosa, azúcar total, maltodextrina, etc.; (8) bebidas, como café, té, etc.; (9) productos farmacéuticos, como por ejemplo, penicilina, hemoderivados, enzimas, vacunas, etc.; (10) la industria bioquímica, de algas, antibióticos forrajeros, extractos de levadura, enzimas, etc.; (11) para control de la contaminación ambiental, por ejemplo, desulfuración de gases de combustión, licor negro de la fabricación del papel, etc.

- ***Secador de circulación***. El material se mantiene en una rejilla de transporte continuo (cinta transportadora) y se sopla aire caliente a través de ella, en donde el material se extiende en una capa, encima de la rejilla, y así pasa a través del secador. Normalmente el gas de secado pasa en flujo cruzado, a través de la capa de sólido. Mujumdar (2006), señala que, al igual que los secadores rotatorios y de aspersión, este tipo de secadores, son de los más versátiles. Productos tan variados en composición, forma y tamaño como cereales recubiertos para el desayuno, nueces, alimento para animales, briquetas de carbón y caucho, se pueden secar en un secador de cinta transportadora.
- ***Secador de túnel***. El material es movido sobre vagones, a través de un túnel en donde entra en contacto con gases calientes. Los túneles continuos son, en muchos casos, compartimentos para camiones o bandejas, que se operan en serie. Los sólidos a procesar se colocan en bandejas o camiones que se mueven progresivamente por el túnel en contacto con gases calientes. Se usa para el secado de grandes objetos sólidos como el secado de los recubrimientos de las carrocerías de automóviles.
- ***Secador de lecho fluidizado***. El sólido es fluidizado por el mismo gas de secado, manteniendo esta condición mientras pasa por el secador. En esta condición el peso del material se equilibra con la fuerza de arrastre del gas, lo que permite aumentar el área de contacto.

Mujumdar (2006), señala que son utilizados comúnmente en el procesamiento de muchos productos como productos químicos, carbohidratos, alimentos, biomateriales, productos para bebidas, cerámicas, productos farmacéuticos en forma de polvo o aglomerados, productos sanitarios, pesticidas y agroquímicos, colorantes y pigmentos, detergentes y agentes de superficie, fertilizantes, polímeros y resinas, taninos, productos para calcinación, combustión, incineración, procesos de gestión de residuos y procesos de protección ambiental. El funcionamiento en lecho fluidizado, ofrece importantes ventajas, como una buena mezcla de sólidos, altas tasas de transferencia de calor y masa y fácil transporte de material. Para el secado de polvos en el rango de tamaño de partícula de 50 μm a 2000 μm, los lechos fluidizados compiten exitosamente con otros tipos de secadores más tradicionales, por ejemplo, rotatorios, de túnel, de circulación, y de bandeja continua.

- ***Secador de lecho de chorro***. Mujumdar (2006), contempla este tipo, no mencionado por Perry (1997), en donde el gas de secado, entra en el fondo de un recipiente cilíndrico, con fondo cónico. En un lecho con chorro, el gas entra por la base y gran parte fluye rápidamente hacia arriba a través de un núcleo central. Difiere del lecho fluidizado normal, porque el gas entra a través de un orificio en la base, provocando un chorro central. Se usa para materiales granulares de gran tamaño de partículas, como granos (alimentos).

Secadores por convección (directos) por lotes

Perry (1997), señala solo tres tipos, en donde el sólido a secar, permanece dentro del equipo de secado, por un tiempo determinado (tiempo de secado), luego de lo cual, se retira del secador, sin embargo, hay tres tipos más, que se pueden incluir en esta subclasificación.

- ***Secador de circulación de aire a través del sólido***. Una cantidad determinada de sólido es puesto en forma de lecho sobre unas rejillas, y el gas de secado circula a través de él.
- ***Secador de bandejas***. Una cantidad determinada de sólido es puesto en bandejas y el gas de secado, circula sobre él y lo seca.
- ***Secador de lecho fluidizado***. Una cantidad determinada de sólido es fluidizado dentro del secador con gas a una velocidad que permite el equilibrio de su fuerza de arrastre, con el peso.
- ***Secador rotatorio***. El material es movido por internos que lo recogen y lo sueltan formando una cortina, mientras el gas de secado, circula a través de

dicha cortina. No tienen inclinación, ya que no es conveniente que el material se vaya hacia alguno de los lados, sino que esté bien distribuido, a lo largo del equipo.

- ***Secador de túnel***. El material sobre vagones, es movido hacia un túnel en donde entra en contacto con gases calientes, por un tiempo terminado.
- ***Secador de lecho de chorro***. En donde el gas de secado, entra en el fondo de un recipiente cilíndrico, con fondo cónico, provocando un chorro central, que agita violentamente al sólido, mientras se seca, por un tiempo detemrinado (Mujumdar, 2006).

Las aplicaciones para estos secadores, son las mismas que para sus contrapartes de funcionamiento continuo, pero no para grandes volúmenes de material a secar, ya que, a más volumen de material, se requiere, más volumen de equipo, lo que conlleva a un lógico límite de escala, sin embargo, controlar el tiempo de secado, implica menos costos de controlar el tiempo de retención, por lo que, para escala artesanal, y hasta cierto punto, para pequeñas y medianas industrias (PYMES), son bastante apropiados.

Secadores por conducción

También llamados secadores indirectos, son aquellos donde el calor, es transferido hacia el material a secar por conducción, a través de una superficie en contacto con éste, la cual normalmente es metálica. Las temperaturas de dicha superficie, pueden ir desde criogénicas, para secadores por congelación, hasta mayores de 500 ºC, para aquellos secadores que usan gases de combustión. Son especialmente recomendados para materiales delgados y muy húmedos. Son adecuados para trabajar en atmósferas inertes, para evitar las mezclas explosivas, debido a reacciones violentas de oxidación o para evitar la descomposición del material, o en vacío, en especial para la recuperación de solventes. Para estos secadores, el gas usado se conoce como gas para eliminar el agua evaporada. Pueden usarse condensados, como medio de calefacción, permitiendo costos operativos mucho más bajos. El manejo del polvillo es mucho más apropiado, con estos secadores. La eficacia térmica de estos secadores es mucho más alta que en los secadores por convección. Para materiales sensibles al calor, puede haber combinaciones de funcionamiento directo, pero con medio de transferencia de calor indirecto, tal como un secador por lecho fluidizado que contiene intercambiadores sumergidos en el lecho en forma de bobina, que transfieren calor por conducción, tal como los usados para pellets de polímeros o resinas. Esta configuración, permite una disminución de 2/3 del tamaño del equipo requerido (Perry, 1997; Mujumdar, 2006).

<u>Secadores por conducción (indirectos) continuos</u>

- ***Secadores de cilindro o rodillo giratorio***. Adecuado para láminas delgadas o mecánicamente débiles que se pueden secar en contacto con una superficie caliente, tales como el papel convencional, papel periódico, papel de seda, etc. Dichas láminas, pasan por la parte exterior del rodillo, que es calentado desde adentro, y cuyo movimiento giratorio, promueve el movimiento de dichas láminas, y hace que el tiempo de contacto sea mínimo. Se pueden obtener efectos superficiales especiales. Adecuado para hojas no continuas, que no necesitan secarse completamente, y que no se dañarán por el contacto con el cilindro caliente.
- ***Secadores de tambor giratorio***. La lechada o pasta viscosa se esparce mecánicamente, mediante la acción de esparcimiento de dos tambores, que giran en sentido contrario, y que tienen un alto flujo de calor dentro de ellos. Debido a la delgada abertura que queda entre ellos, se forman dos hojas delgadas de material a secar, las cuales se adhieren a ambos tambores, secándose rápidamente de forma conductiva. La hoja delgada que contiene materiales sensibles al calor, como las vitaminas, también se puede secar al vacío a una temperatura más baja. Se usa ampliamente en todo el mundo en la producción de almidón pregelatinizado para formulaciones de alimentos instantáneos (Mujumdar, 2006).
- ***Secador de tornillo transportador***. Es aplicable para líquidos, lechadas, pastas y lodos, con recirculación de producto seco. Adecuado para partículas que fluyen libremente al estar húmedas y para sólidos granulares y fibrosos, siempre que no sean pegajosos o sensibles a la temperatura. El transporte del sólido en estos equipos, se basan en el principio de funcionamiento del tornillo de Arquímedes, en donde el elemento transportador, es un metal plano moldeado en forma de hélice (hélice de tornillo sin fin), el cual rota, alrededor del eje longitudinal y transporta el material a granel en una artesa en reposo en dirección axial, sirviendo como elemento portante y como medio para la transferencia de calor, ya que tanto la artesa como el eje, el cual es hueco para la circulación del fluido de calentamiento dentro de él, son calentados con vapor. Waje *et al*. (2007), señalan que estos equipos, tienen una clara ventaja sobre los secadores de cinta transportadora, ya que el primero, puede ser un dispositivo cerrado, lo que proporciona un buen control del flujo de sólidos y proporciona una solución ambientalmente limpia a los problemas de manipulación de partículas. Los transportadores de tornillo son útiles cuando se trata de polvos finos o materiales polvorientos o tóxicos. Los tornillos son generalmente más versátiles que las cintas transportadoras, ocupan menos espacio y tienen un rendimiento[§§§] excelente con respecto al

[§§§] Finalmente, y en relación con las aclaratorias hechas con anterioridad con respecto a eficiencia, eficacia y rendimiento, el rendimiento, es el fruto o utilidad de una cosa en relación con lo que cuesta, con lo que

volumen efectivo. Además, son rentables y fáciles de instalar, y encuentran, numerosas aplicaciones industriales en el procesamiento agrícola, de alimentos y bebidas; plásticos; farmacéutico; químico; minería; petróleo y gas; e industrias de la construcción.

- ***Secador rotatorio indirecto de tubos de vapor***. Mujumdar (2006), señala que son los secadores rotatorios indirectos más comunes, y se usan, cuando los de contacto directo no son adecuados, ya sea, porque el contacto directo con gases calientes no está permitido, por razones de calidad del producto, o debido a la presencia de partículas finas, que pueden ser arrastradas junto con los flujos de gas de secado, siendo algunas de sus aplicaciones, los compuestos orgánico de alta humedad, granos de destilería, pulpa de cítricos, tortas de filtración de pigmentos, tiza precipitada (carbonato de calcio), sólidos inorgánicos finamente divididos y concentrados de flotación.
- ***Secador de platos vibratorios***. Adecuados para sólidos granulares, cristalinos o fibrosos de flujo libre que se pueden transportar en una bandeja vibratoria, tales como bayas y granos de café (Meneres *et al*., 1989), y para polvos que fluyen libremente en estado húmedo. El secado en estos equipos consiste en alimentar, varios niveles de platos, desde el más alto, a través de los cuales, se suministrará el calor. El movimiento vibracional de los platos, les permite manejar, cierto tiempo de residencia para el sólido, el cual, al caer del plato por uno de los extremos, es conducido por un bajante hacia el plato siguiente en el nivel inferior. Una corriente de aire, debe transportar el vapor de agua eliminado, hacia la salida de gases del equipo (Meneres *et al*., 1989).
- ***Secador de lecho fluidizado con intercambiadores sumergidos***. Mujumdar (2006), indica que, la corriente de gas, fluidifica el material y transporta la humedad evaporada, y el calor, es transferido por tubos, por donde circula el medio de calefacción, los cuales son normalmente horizontales. Se utilizan para secar polvos finos o de menor tamaño. Esto se debe a que el coeficiente de transferencia de calor disminuye al aumentar el tamaño de las partículas. En lugar de tubos, también se utilizan placas verticales como calentadores sumergidos, o bobinas.

Secadores por conducción (indirectos) por lotes

---

gasta, con lo que en ello se ha invertido, etc., o fruto del trabajo o el esfuerzo de una persona. Dentro del ámbito de los secadores, se puede definir, como la razón de un servicio que consume el equipo, o un costo en el que se incurre por la operación del equipo, con respecto al efecto que este genera, bien sobre la cantidad de agua evaporada o bien sobre la cantidad de alimentación procesada, ambas variables, en la misma escala de tiempo. Por ejemplo, el rendimiento se puede medir en costos de operación en dólares por kilogramos de material procesado o, energía suministrada al calentador en kilojouls por kilogramos de agua evaporada. Es un término más orientado al ámbito económico de la operación de secado.

- ***Secadores de recipiente agitado***. El primer subtipo es el secador con agitación vertical, de forma cónica, usado comúnmente, para secar solventes o productos farmacéuticos de flujo libre en estado húmedo, y productos químicos finos, por lo que el secador normalmente se opera al vacío. La acción de agitación es proporcionada por un tornillo montado internamente, que se puede calentar para proporcionar un calentamiento adicional al disponible a través de la pared del recipiente, el cual, gira sobre su propio eje y también se mueve alrededor del secador, en un brazo en órbita. La distancia entre el tornillo y la pared del recipiente se mantiene pequeña, de modo que la capa de material en la superficie de calentamiento, sea renovada continuamente. A medida que el tornillo gira alrededor de toda la circunferencia del recipiente, también proporciona autolimpieza de las paredes del recipiente. La cubierta también se calienta normalmente para evitar la condensación de vapor. El medio de calentamiento para este tipo de secador es agua caliente, vapor o aceite caliente (Mujumdar, 2006). Otro subtipo de secadores con agitación es el secador con agitación horizontal, que consiste en una carcasa cilíndrica horizontal estacionaria, en la que un conjunto de palas agitadoras montadas sobre un eje central, mezcla el material húmedo en proceso de secado. El calor se suministra al secador, e indirectamente al material de secado, mediante la circulación de agua caliente, vapor o fluido de transferencia de calor a través de una camisa que rodea la carcasa y, en unidades más grandes, a través del eje central hueco. Este subtipo de secador, puede subdividirse según el tipo de agitador, en, secadores de paletas y secadores de tornillo sin fin. Se usa para materiales sensibles al calor y puede operar en vacío. Es adecuado para migas de chocolate, harina de maíz y repostería (Mujumdar, 2006).
- ***Secadores por sublimación a temperatura de congelación y vacío (Liofilización)***. En la liofilización, el agua u otro disolvente se elimina en forma de vapor por sublimación del material congelado en una cámara de vacío. Después de que el solvente se sublima a vapor, se retira de la cámara de secado. Un factor destacado es la rigidez estructural que proporciona la sustancia congelada en la superficie donde se produce la sublimación. Esta rigidez evita en gran medida el colapso de la matriz sólida que queda después del secado. El resultado es una estructura porosa y no encogida en el producto seco que facilita la rehidratación rápida y casi completa cuando se agrega agua a la sustancia en un momento posterior, por ejemplo, las vacunas y los materiales farmacéuticos (penicilina y plasma sanguíneo, por ejemplo) se reconstituyen muy a menudo en soluciones fisiológicas bastante diferentes de las originales, debido a que son las más adecuadas para inyecciones intramusculares o intravenosas, y esto se logra de forma

eficiente, debido a que se producen, mediante esta técnica. La liofilización se usa para deshidratar alimentos que de otro modo serían difíciles de secar, como café, cebolla, sopas y ciertos mariscos y frutas, ya que el secado por congelación produce un producto alimenticio de más alta calidad, al que se podría obtener mediante cualquier método de secado (Mujumdar, 2006).

- ***Secadores giratorios de vacío***. El secador giratorio de vacío (por ejemplo, el de forma de doble cono) es esencialmente un recipiente giratorio que contiene materiales a secar. El calor por conducción se provee a través de una chaqueta en la carcasa del secador, por donde se hace circular el medio de calefacción. Este tipo de secadores se usa ampliamente para secar materiales como polvos, gránulos y cristales que fluyen libremente (Mujumdar, 2006).
- ***Secador de bandejas de vacío***. En este tipo básico de secadores indirectos, el material a secar, se coloca en cacerolas o bandejas, que son calentados por el medio calefactor, que puede variar desde vapor a alta presión, para operación de temperatura moderada a alta, hasta vapor subatmosférico, para funcionamiento a baja temperatura, e inclusive, aceite caliente o un calentador eléctrico, en el caso de unidades más pequeñas. Las bandejas son generalmente de metal para asegurar una buena transferencia de calor. El número de estantes, que contiene las bandejas, varía por lo general, entre 1 a más de 20, en una unidad grande. Para materiales termosensibles, el secado puede realizarse a baja temperatura, con la aplicación de vacío para reducir el punto de ebullición del líquido a remover, en especial, cuando son solventes tóxicos o valiosos que deben ser recuperados. Se aplica vacío a la cámara de secado y el vapor se elimina a través de un tubo de escape conectado a la cámara; esta línea también está conectada a un condensador donde el vapor se condensa y, posiblemente, se recupera. El gas no condensable sale a través de la fuente de vacío, que puede ser una bomba de vacío o un eyector de vapor (Mujumdar, 2006).

Secadores por radiación

Estos secadores, pueden usar fuentes de radiación electromagnética con distintas longitudes de onda, para secar un material, desde el espectro solar, hasta las microondas (de 0,2 m a 0,2 μm). En esta clasificación normalmente entran aquellos que usan una fuente de radiación infrarroja para secar, los secadores solares y secadores por calentamiento dieléctrico (con frecuencias entre 1 MHz y 100 MHz), que son aquellos en donde el calor se genera desde dentro del material, al someterlo a un campo eléctrico de alta frecuencia. También se incluyen los secadores de microondas (con frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz). En los secadores infrarrojos, la fuente de radiación pueden ser lámparas eléctricas

especiales, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por combustión. No son de uso masivo en la industria y sus altos costos de inversión y operativos, los hacen privativos para conceptos de secado total, teniendo una pequeña aplicación en la corrección de la humedad final de películas de pinturas o para el calentamiento de capas finas de algunos materiales. Los secadores con fuentes de energía dieléctricas o de microondas, generan calor dentro del material, y es considerado incorrecto definir dichas fuentes de energía como fuentes de calor (Perry, 1997; Mujumdar, 2006).

Selección de secadores

La selección del tipo de secador es una de las áreas más complejas y poco comprendidas en la tecnología de secado, siendo inclusive catalogada por algunos, como un "arte oscura". Se ha descuidado en gran medida en la literatura, debido a la dificultad para llevar a cabo este proceso de forma cuantitativa. Hay una gran cantidad de tipos de secadoras disponibles y dentro de cada tipo hay varias opciones. El requisito básico para el secador es que debe lograr la cantidad requerida de secado en un tiempo razonable, ser capaz de manipular el material y producir un producto de calidad aceptable, con un equipo de tamaño y costo adecuados, que cumpla con todos los requisitos ambientales y de seguridad relevantes (Kemp y Bahu, 1995).

Es un proceso complejo, que no es del todo científico, ya que implica a su vez, un juicio subjetivo y un empirismo considerable. Se debe tener en cuenta que, los procesos aguas arriba y aguas abajo, del secado, también tienen una influencia importante en la selección de los tipos de secadores, adecuados para una aplicación determinada (Lababidi y Baker, 1999; Mujumdar, 2000). De hecho, Mujumdar (2000), considera que, para una selección óptima del proceso, se debe examinar el proceso completo que implica toda la planta donde se instalará el secador, así como el del sistema de secado requerido, referido a los equipos asociados a dicho secador, y que juntos constituyen un **sistema de secado**. En la bibliografía técnica se han citado más de 400 tipos de secadores, aunque en la práctica sólo se encuentran habitualmente unos 50 tipos.

Cabe señalar que el proceso de selección se complica aún más por el hecho de que cada categoría de secadores (por ejemplo, lecho fluido, flash, aspersión, rotativo) tiene una amplia variedad de subclases, y además, para cada caso, se debe hallar la condición óptima de operación, para que la elección por esta vía, sea totalmente objetiva. A veces la selección es fácil, pero cuando se trata de un nuevo producto o cuando la capacidad requerida, excede la más alta que se consigue en el mercado de secadores estandar, no siempre es una tarea fácil. Los nuevos requisitos sobre

aspectos de seguridad y medioambientales también pueden dificultar la selección (Mujumdar, 2000).

Mujumdar (2000), señala que, en el año 1999, más del 80 por ciento de las principales empresas químicas de Europa, cada una con más de 1000 secadores en sus instalaciones de producción, cometieron errores al seleccionar secadores. La selección óptima en un lugar en un momento determinado puede ser una selección incorrecta para otra ubicación geográfica algunos años después. El uso previo, es una ayuda definitiva, pero no el único criterio que se debe utilizar para seleccionar los sistemas de secado. Como ejemplo, el mineral de níquel concentrado, se seca en diferentes partes del mundo a tasas de producción muy altas (20 Mg/h - 75 Mg/h), utilizando secadores flash, secadores de lecho fluido, secadores rotativos y secadores por aspersión. Por tanto, no es una tarea sencilla seleccionar un secador para tales aplicaciones basándose en lo que se hace en otros lugares.

Según Perry (1997), la data inicial a recabar, para seleccionar el mejor secador, es la siguiente.

I. Propiedades del material manipulado.
  a. Características físicas cuando está mojado.
  b. Características físicas en seco.
  c. Corrosividad.
  d. Toxicidad.
  e. Inflamabilidad.
  f. Tamaño de partícula.
  g. Abrasividad.

II. Características de secado del material.
  a. Tipo de humedades (ligadas, no ligadas o ambas).
  b. Contenido de humedad inicial.
  c. Contenido de humedad final (máximo).
  d. Temperatura de secado permitida.
  e. Tiempo de secado probable para diferentes secadores.

III. Flujo de material hacia y desde el secador.
  a. Cantidad a manipular por hora.
  b. Operación continua o por lotes.
  c. Proceso previo al secado.
  d. Proceso posterior al secado.

IV. Cualidades del producto.
  a. Contracción.
  b. Contaminación.

c. Uniformidad del contenido de humedad final.
d. Descomposición del producto.
e. Sobresecado.
f. Estado de subdivisión.
g. Temperatura del producto.
h. Densidad aparente.

V. Problemas de recuperación.
a. Recuperación de polvo.
b. Recuperación de solventes.

VI. Instalaciones disponibles en el lugar de la ubicación propuesta.
a. Espacio.
b. Temperatura, humedad y limpieza del aire.
c. Combustibles disponibles.
d. Energía eléctrica disponible.
e. Valores admisibles de ruido, vibración, polvo o calor.
f. Fuente de alimentación húmeda.
g. Salidas de gases de combustión.

Por otro lado, Mujumdar (2000), opina, que debe recabarse, la siguiente información previa al proceso de selección.

I. Forma física del alimento. Granular, particulado, lodo, cristalino, líquido, pastoso, suspensión, solución, hojas continuas, tablones, formas extrañas (pequeñas/grandes), pegajoso, grumoso.

II. Capacidad[****] requerida promedio. Continuo, kilogramos por hora (seco/húmedo); por lotes, kilogramos por lote (seco/húmedo).

III. Variación esperada en la capacidad requerida (relación de rechazo).

IV. Elección de combustible. Aceite, Gas, Electricidad.

V. Operaciones de pre y post-secado (si hubiere).

[****] Mientras no se señale que la capacidad, es la capacidad de evaporación del secador, se asume que es la capacidad requerida o instalada, es decir, el flujo másico de alimentación establecido en el diseño, o el flujo másico máximo de alimentación, que puede manejar un secador ya construido, respectivamente.
La capacidad de evaporación, o capacidad a secas, es un término más usado para la comercialización de secadores. En el **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, usaremos por defecto, el término con el significado propio de la Ingeniería de planta o de proyectos, el cual se refiere a la alimentación, como se mencionó al inicio, a menos que se diga explícitamente lo contrario, en especial, cuando se hable de especificaciones de fabricantes. La **capacidad requerida**, es aquella especificada para el diseño, y la **capacidad instalada** es la que finalmente puede manejar el equipo construido, a su máxima capacidad.

VI. Para productos particulados. Tamaño medio de partículas, distribución de tamaño, densidad de partícula, densidad aparente, propiedades de rehidratación

VII. Contenido de humedad de entrada/salida. Base seca y base húmeda.

VIII. Caracterización química/bioquímica/actividad microbiológica.

IX. Sensibilidad al calor. Punto de fusión, temperatura de transición vítrea.

X. Isotermas de sorción (contenido de humedad en el equilibrio)

XI. Tiempo de secado. Curvas de secado, efecto de las variables del proceso sobre la velocidad de secado.

XII. Requisitos especiales. Material de construcción, corrosión, toxicidad, solución no acuosa, límites de inflamabilidad, peligro de incendio, requisitos de color/textura/aroma (para alimentos, si los hubiera).

XIII. Disponibilidad de espacio para el secador y sus equipos asociados.

Perry (1997), señala cuatro pasos básicos para la selección adecuada de un secador:

1. Selección inicial del secador. Se deben descartar, aquellas aplicaciones que no sean adecuadas para la naturaleza física del material que se va a secar, así como aquellos que no producen un producto con la calidad deseada. Por ejemplo, una lámina continua de papel, no puede ser secada en un secador rotatorio, por lo que estaría descartado en esta etapa, así como un material fibroso, como el bagazo de caña, no estaría indicado para ser secado en un secador por aspersión.

2. Comparación inicial de secadores. Los secadores seleccionados pueden ser comparados, a partir de sus datos de desempeño, a través de simulaciones y evaluaciones económicas preliminares. Esto limitará aún más el número de opciones y disminuirá el número de costosas corridas piloto, del paso siguiente. Se deben descartar en este punto, opciones antieconómicas o prototipos, sin o con poco historial de desempeño, o sin una sólida reputación. Aquí también se deben tomar muy en cuenta, aquellas opciones que no requieran equipos previos o posteriores al proceso de secado, como filtros, clasificadores, molinos, transportadores, etc.

Kemp y Bahu (1995); Kiranoudis *et al*. (1996); y Lababidi y Baker (1999); han presentado métodos para la comparación inicial del secador.

Kemp y Bahu (1995), desarrollaron un algoritmo de 5 pasos, el cual es un sistema experto, que maneja la información de forma matricial, y debe ser abordado a través

de herramientas computacionales. El árbol de búsqueda básico de selección de secadores, que se muestra en la Figura 1.38, está basado precisamente, en la clasificación generalizada, descrita anteriormente. Sin embargo, además de descender por las distintas ramas del árbol de secadores, también se debe estudiar el efecto de las diversas propiedades del material y los parámetros de la configuración del sistema de secado, en la rama que se esté analizando. Para lograr esto, se utiliza un sistema basado en reglas, teniendo en cuenta, más de 50 reglas, que cubren aspectos como el tamaño de las partículas, la pegajosidad, el flujo y el contenido de humedad de entrada y salida de sólidos.

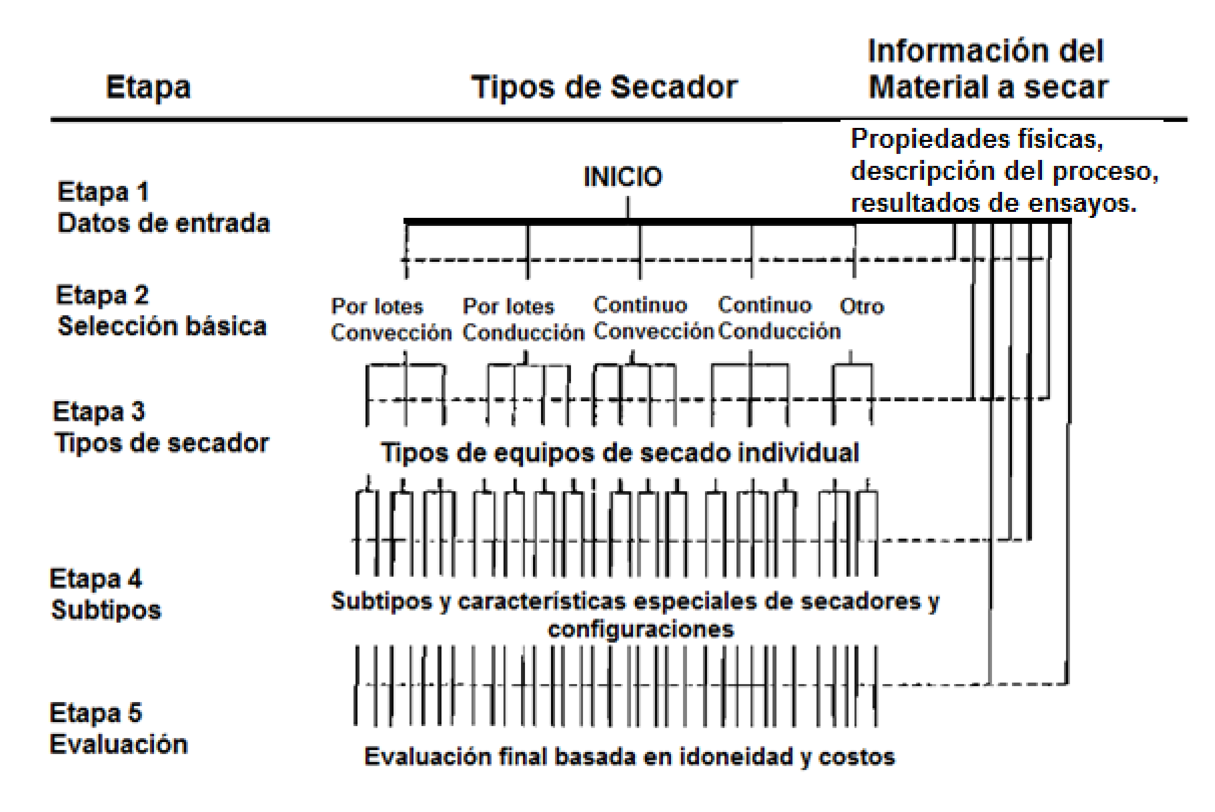


Figura 1.38. Estructura de la matriz del procedimiento de selección (Adaptado de Kemp y Bahu, 1995).

- ***Etapa 1. Definición del problema y recolección de información.*** La información requerida sobre el material, puede ingresarse al algoritmo de forma cualitativa o cuantitativa. Si se ingresa de forma cualitativa, debe haber una escala de calificación adecuada, por ejemplo, en el caso de la pegajosidad, pudiera establecerse la escala de: (1) No pegajoso; (2) medianamente pegajoso; (3) pegajoso; (4) muy pegajoso; (5) extremadamente pegajoso. La información requerida, es la siguiente: (1) forma de la alimentación y del producto (lodo, líquido, polvo, gránulos, hojas, etc.); (2) identificación del solvente a ser removido, y determinación de sus

propiedades físicas y termofísicas; (3) capacidad requerida; humedades de entrada y salida, variabilidad aceptada y nivel de impurezas; (4) tamaño y distribución de tamaño de partículas, forma y propiedades físicas; (5) procesos aguas arriba y aguas abajo del secador. La información relacionada con ensayos de laboratorio y pruebas controladas a escala piloto, y que requiere el algoritmo, es la siguiente: (1) cinética de secado (velocidad de secado y el efecto sobre esta, de la velocidad lineal, humedad y temperatura del gas); (2) curva de humedad de equilibrio, y (3) ecuación de la humedad de pseudo-equilibrio dinámico (Faneite *et al*., 2016 y 2020); (4) microscopía (propiedades superficiales y aglomeración); (5) ensayo con el evaporador rotatorio a escala de laboratorio (sobrecalentamiento, formación de bolas, adhesión); (6) ensayo con tambor giratorio (desgaste, formación de polvo); (7) ensayo en placa térmica Koflar (descomposición térmica); (8) pruebas de adhesión/cohesión (manipulación, efecto del contenido de humedad, pegajosidad).

- ***Etapa 2. Selección básica*.** Se pueden tomar cuatro decisiones importantes en una etapa temprana para reducir el procedimiento de búsqueda del árbol lo más rápido posible: (1) Selección debido a la forma de la alimentación y del producto, incluidas las posibilidades de modificación de dicha forma (La mayoría de los secadores pueden manejar materiales particulados, pero solo ciertos tipos pueden procesar lechadas, hojas o láminas, por lo tanto, para una determinada forma de alimento y producto, muchos secadores pueden eliminarse en esta etapa, sin embargo, la modificación de la alimentación o el post-procesamiento del producto también deben considerarse y pueden aumentar la gama de posibles opciones de secado); (2) Operación por lotes o continua. En los equipos por lotes, la integridad del material se garantiza más que en los equipos continuos y a su vez, se requieren menos equipos, aguas arriba y aguas abajo, sin embargo, requieren más mano de obra, ya que cada lote debe cargarse y descargarse y mayores tiempos de residencia. En general, los secadores discontinuos, no se utilizan para capacidades requeridas superiores a 1000 kg/h, mientras que los secadores continuos, rara vez se utilizan para capacidades requeridas inferiores a 50 kg/h; (3) Modo de calentamiento: conducción, convección u otro método. Este criterio es un poco más complejo, y las opciones principales son conducción o convección, sin embargo, el calentamiento por radiación, por fuentes de energía dieléctrica o combinaciones, no se deben descartar. Los secadores convectivos, especialmente los secadores de dispersión, utilizan flujos de gas más altos y logran mayores tasas de transferencia de calor que los secadores por conducción, por lo tanto, pueden lograr un secado mucho más rápido, especialmente en el secado del agua libre, sin embargo, el *calor que*

escapa con el gas, es mayor y podrían requerir contención, para emisiones o particulado que salen con el gas de salida. Donde la temperatura es estrictamente limitada, los secadores de conducción, al vacío, pueden proporcionar la mejor solución. Por el contrario, los secadores convectivos son efectivos en aplicaciones de alta temperatura y pueden usar gases de escape de un horno, o de una turbina de gas, logrando un sistema combinado de calor y energía. Los secadores dieléctricos, RF y microondas, liberan energía dentro del material, lo que acelera el secado de láminas y bandas, pero tienen un alto costo de capital y energía; se pueden utilizar de forma beneficiosa para proporcionar una pequeña cantidad, digamos 5% de la energía requerida, y el resto se suministra por medios térmicos convencionales; (4) Si se deben considerar los secadores de dos o múltiples etapas, así como combinaciones de secadores de una etapa. También, si se pueden utilizarse en serie, dos secadores con características diferentes, lo cual pudiera ser una buena opción, cuando la velocidad de secado o las características de manipulación del material, cambian notablemente durante el proceso de secado. En el primer caso, se puede usar un secador de dispersión, por ejemplo, transporte neumático, antes de un secador de tiempo de residencia prolongado, por ejemplo, lecho fluidizado o agitación horizontal, con la transición llegando al *contenido crítico de humedad*[††††] o por debajo de él.

- ***Etapa 3. Tipos de secador*.** En esta etapa, se lleva a cabo una amplia distinción por tipo de secador, entre el considerable número que aún estén como elegibles, después de la etapa anterior, por medio de un puntaje. Por lo general, no es posible decir aquí, que un determinado tipo de secador nunca se podrá usar, pero ciertamente será posible decir, que es probable o poco probable que sea adecuado, por lo que la decisión final, debe dejarse al cliente, a su representante técnico o al asesor experto. Esta es la etapa en la que se utilizan la mayoría de las reglas de selección. Las características del material y la descripción del proceso, se comparan con la capacidad de cada secador individual para trabajar en estas condiciones. Además, se puede realizar un dimensionamiento aproximado de muchos tipos de secadores, con métodos no rigurosos, para encontrar las condiciones de salida, el tiempo de residencia, tamaño y costos preliminares, aproximados. Esta información se puede utilizar, para eliminar cualquier secador que sea ridículamente grande, deforme o costoso.
- ***Etapa 4. Subtipos*.** El principio básico aquí es similar al de la Etapa 3, pero se requerirá, un mayor número de reglas, y mucho más detalladas, debido,

[††††] Término que será explicado en el Módulo 2.

a que cada tipo de secador seleccionado, en la Etapa 3, puede tener varios subtipos, por ejemplo, existen muchos tipos diferentes de agitadores para secadores de agitación horizontal; algunos se calientan, y algunos no, y esto está relacionado con la capacidad y el rango de adherencia que se pueden manejar. Se pueden considerar refinamientos, de la configuración del sistema de secado, como el reciclado de gas o el uso de gas portador inerte. Los cálculos de tamaño aproximado, también son útiles en esta situación, ya que pueden sugerir una preferencia entre subtipos. Por ejemplo, para los secadores de transporte neumático, un tiempo de residencia calculado de menos de 1 segundo y una longitud de menos de 20 m indica que un tubo vertical recto, será el adecuado, mientras que los tiempos de residencia de más de 5 segundos y las longitudes de más de 50 m, indican claramente que es preferible, una variante de tipo anillo.

- **Etapa 5. Evaluación.** Cuando el algoritmo genere los resultados de la Etapa 4, se debe hacer una consideración final, basada en la experiencia del seleccionador, y de los requerimientos específicos de la planta donde se instalará el secador. Esta etapa debe permitir: (1) Obtener dos o tres de los secadores más apropiados para la aplicación requerida, como mínimo; (2) obtener las ventajas y desventajas de cada opción; (3) permitir el refinamiento y la sugerencia de incorporación, de características especiales, para cada alternativa. Kemp y Bahu (1995), señalan, que la decisión final debe hacerse a través de un análisis de costos, y lo más recomendable es tener la mayor cantidad posible de datos de los secadores seleccionados, para solicitar cotización a los fabricantes y empresas de transporte.

Kiranoudis *et al*. (1996), señalan que, el procedimiento de comparación inicial de secadores, se puede llevar a cabo de una forma satisfactoria, evaluando configuraciones de diseño, frente al rendimiento operacional[‡‡‡‡] de los tipos de secadores a comparar. En primer lugar, los aspectos del diseño se pueden explorar con éxito mediante la construcción de las curvas de costos óptimos anuales totales para las diferentes configuraciones de diseño de cada tipo de secador a comparar, en donde un punto de esta curva, representa una configuración de diseño, con la alimentación o capacidad[§§§§], como valor en el eje *x*, a la cual, se minimizan (optimizan) los costos totales anuales, los cuales, representan el valor numérico de dicho punto, o dicha configuración de diseño, en el eje *y*. Por lo tanto, estas curvas, contienen información concentrada sobre el diseño, con respecto a la configuración

---

[‡‡‡‡] El rendimiento para Kiranoudis *et al*. (1996), viene dado por la razón, del costo de procesamiento por cantidad de materia prima procesada, expresada en dólares, por tonelada de producto húmedo producido.
[§§§§] Aquellas capacidades que minimicen los costos totales anuales.

óptima del secador, el tamaño y los parámetros operativos, y serían la primera fase de este método.

Se evalúan, optimizando la capacidad de cada configuración establecida, para cada tipo de secador, en base a la minimización de los costos anuales totales, a través de algoritmos y facilidades computacionales (bajo las restricciones impuestas por la termodinámica, la construcción y el razonamiento de la calidad del producto). Luego se grafican los costos anuales totales en función de las configuraciones evaluadas, expresadas numéricamente, en términos de sus capacidades óptimas, y se seleccionan, aquellas configuraciones óptimas que coincidan con la capacidad requerida.

La Figura 1.39, muestra un ejemplo de curvas de costos óptimos anuales totales versus alimentación para diferentes configuraciones de secadores de cinta transportadora, para un caso presentado por Kiranoudis *et al*. (1996) (los autores usan como notación una D, acompañada de números que denotan números de cámaras y otros aspectos de diseño), con dos restricciones, una de superficie máxima de la cinta (A_{CTMAX}) de 5 m^2 y otra de 10 m^2.

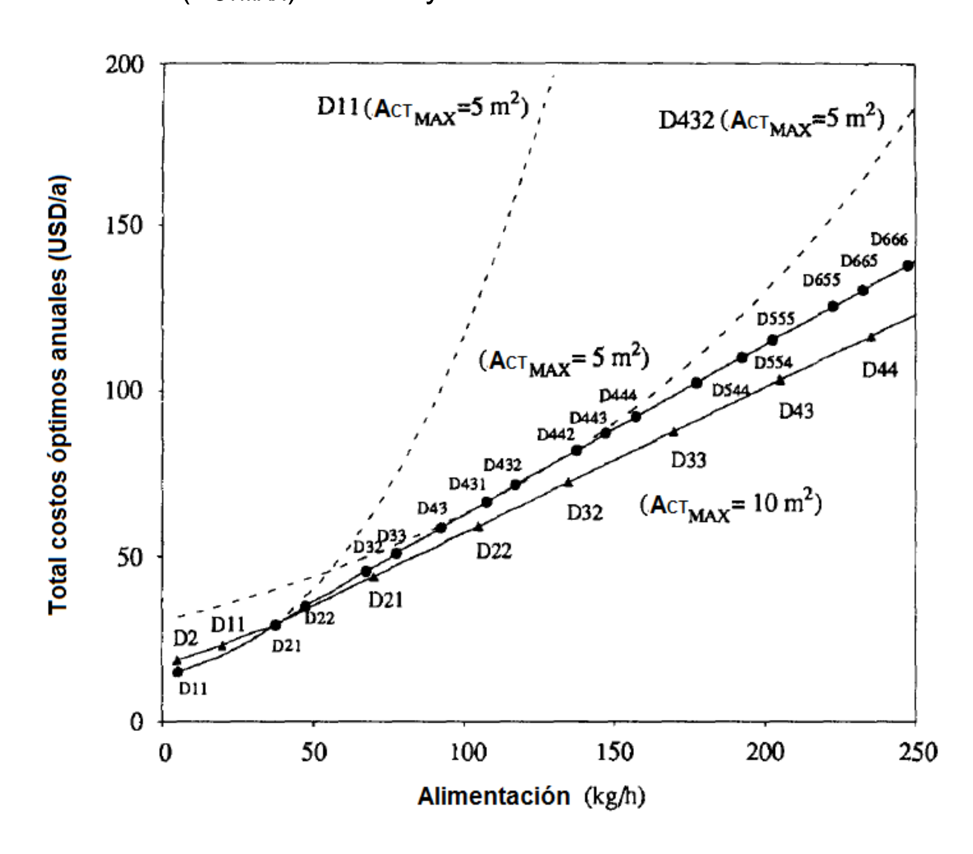


Figura 1.39. Ejemplo de una curva de total costos óptimos anuales en función de la alimentación para diferentes diseños de un secador (Adaptado de Kiranoudis *et al*., 1996).

Una vez que se han seleccionado las configuraciones de diseño más prometedoras, para los distintos tipos de secadores evaluados, se construyen curvas de costos operativos óptimos, en un amplio rango de capacidades operativas, y se comparan entre sí, siendo esta, la segunda fase del método propuesto por Kiranoudis *et al*. (1996). Las curvas de costos operativos óptimos, versus la capacidad operativa, de los distintos secadores evaluados, son la esencia de este procedimiento de comparación de secadores. La comparación del rendimiento operativo, permiten llegar a la decisión final.

Así mismo, Kiranoudis *et al*. (1996), presentaron un estudio preliminar de selección, para el secado de 200 Mg/a (bs) de papas, con un factor de uso de 2000 h/a, tomando en consideración, tres de los sistemas de secado directo, por convección, más populares, el secador rotatorio, el de cinta transportadora y el de lecho fluidizado. La evaluación económica del secador se basó en la determinación de los costos óptimos anuales totales, que incluyen los costos de capital (con un tiempo de pago de 5 años) y los costos operativos. El costo de capital[*****], está relacionado, con el área de cada secador (es decir, los gastos de construcción), el área de los intercambiadores de calor y la potencia instalada de los ventiladores involucrados. El costo operativo de la planta, se refiere, a los cotos de la energía térmica y eléctrica, consumida en intercambiadores de calor y ventiladores, respectivamente.

El material se estableció en forma de cubos de 10 mm de lado, con una humedad inicial de 83,33 % (bh), y final de 4,76 % (bh). Se estableció para el aire de secado, una temperatura máxima de 75 ºC, para preservar la calidad del producto, con una humedad relativa, antes de la entrada al sistema, de 45,34 %, a 25 ºC.

Aplicando la metodología recomendada por Kiranoudis *et al*. (1996), resultó que el secador de lecho fluidizado, presenta un costo anual total de 93,9 kUSD/a (5,1 % de capital y 94,9 % de costos operativos). El costo total de procesamiento para este caso (rendimiento), es de 59 USD/Mg (bh) (reducido a 56 USD/Mg, bh, cuando se eliminan los gastos de capital). Para el secador rotatorio, se encontró que el costo anual total fue de 122 kUSD/a (74,8 % de capital y 25,2 % de costos operativos), siendo el costo total de procesamiento para este caso, de 68 USD/Mg (bh) (reducido a solo 17 USD/Mg, bh, cuando se liquida el costo de capital). El secador rotatorio es bastante caro en comparación con el lecho fluidizado debido a los inmensos gastos de capital involucrados, sin embargo, el rendimiento operativo de los

[*****] Los costos de capital son gastos fijos y únicos incurridos en la compra de terrenos, edificios, construcción y equipos utilizados en la producción de bienes o en la prestación de servicios. En otras palabras, es el costo total necesario para llevar un proyecto a un estado comercialmente operativo. El hecho de que un costo en particular sea de capital o no, depende de muchos factores, como la contabilidad, las leyes fiscales y la materialidad.

secadores rotatorios, es extremadamente mejor debido a la naturaleza del proceso que facilita la transferencia de calor dentro de la fase sólida.

El rendimiento para los secadores de cinta transportadora, se encontró entre 46 USD/Mg y 43 USD/Mg (reducido entre 3 USD/Mg y 2,26 USD/Mg, bh, cuando se liquida el costo de capital), mientras que el costo total anual, estuvo entre 84,5 kUSD/a y 78,6 kUSD/a (47,3 % de capital y 52,7 % de componentes operativos). Este rango de resultados se debe a los distintos diseños evaluados y la selección de dos de ellos, como configuraciones más prometedoras.

El estudio de Kiranoudis *et al*. (1996), concluye que, los secadores rotatorios involucran equipos costosos, pero garantizan un funcionamiento bastante satisfactorio. Los secadores de lecho fluidizado implican enormes gastos operativos y no son flexibles en su funcionamiento, sin embargo, son muy baratos de construir. En el caso de los productos alimenticios, los secadores de cinta transportadora son probablemente la mejor solución. Los resultados del análisis adoptado, se basan en criterios estrictamente económicos y técnicos. Obviamente, diferentes escenarios de costos podrían producir resultados completamente diferentes.

Lababidi y Baker (1999), desarrollaron un sistema experto, apoyado en lógica difusa para seleccionar secadores. Los datos de entrada del algoritmo, son solamente, forma y características de la alimentación, y capacidad requerida, ya que este, está limitado a secadores por lotes y para aplicaciones en el área de alimentos. Los dos componentes básicos del algoritmo son la *base de datos de conocimientos* y el *motor de inferencia*.

Por lo tanto, la primera etapa en la construcción del sistema fue la adquisición de conocimientos, los cuales, se extrajeron, refinaron y estructuraron para que pudieran ser utilizados en el proceso de razonamiento. En la práctica, cualquier sistema automatizado, para la selección de secadores, es tan bueno como su base de conocimientos. La *base de datos de conocimientos*, se construyó progresivamente, a través de una serie de sesiones de consulta, entre el experto en secadores y el especialista en inteligencia artificial.

A continuación, el conocimiento extraído se ordena en forma jerárquica (árbol), donde los nodos finales (hojas) son los tipos de secadores, y los nodos intermedios (ramas) son las opciones de decisión (variables). En la Figura 1.40 se muestra un ejemplo de la forma de representación jerárquica del conocimiento.

El conocimiento obtenido se expresó en la forma de 80 reglas-base, en donde cada regla implica que, si conocemos un hecho (condición, hipótesis, antecedente), podemos inferir, o derivar, otro hecho llamado conclusión (consecuente). Las reglas,

están asociadas con parámetros de certeza, que representan el grado de confianza al tomar la decisión (conclusión).

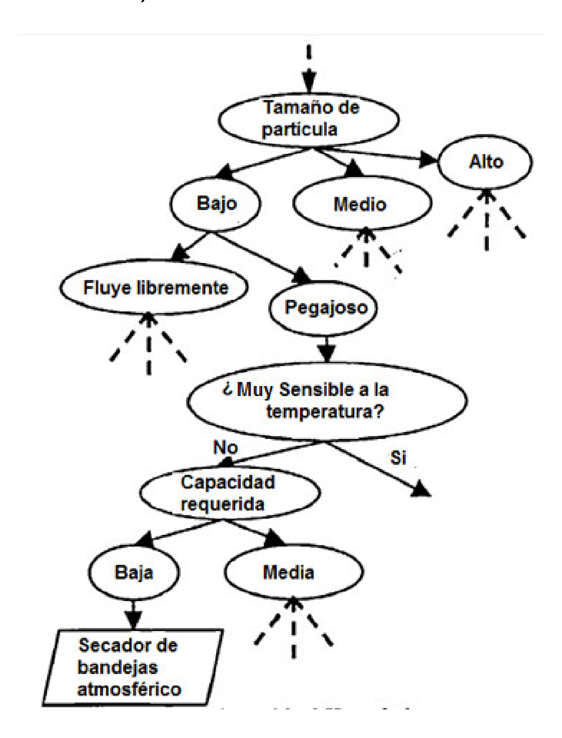


Figura 1.40. Estructura de conocimiento jerárquica (Adaptado de Lababidi y Baker, 1999).

Sin embargo, las condiciones no siempre se pueden representar con valores booleanos (es decir, verdadero o falso. 1 y 0, respectivamente) debido al hecho de que la concordancia entre los datos de entrada y las condiciones requeridas, para secadores, puede ser solo parcial. En términos de la cohesión, por ejemplo, existe una diferencia considerable, en términos físicos, entre un sólido que exhibe una ligera pegajosidad en su superficie cuando está húmedo, y uno que es altamente cohesivo en todas las condiciones. Asimismo, existen grados de fragilidad. Esta imprecisión también debe tenerse en cuenta al seleccionar un secador, siendo el sistema experto apoyado en lógica difusa, muy adecuado para este propósito.

Por esta razón, el algoritmo (*motor de inferencia*) se construyó, apoyado en la teoría de conjuntos difusos, la cual es capaz de manejar de manera coherente, condiciones de coincidencia que contienen términos mal definidos, vagos e imprecisos, y evaluar el grado de certeza (confianza) asociado con las reglas. De esta forma, los valores numéricos, de las seis variables de entrada, seleccionadas: (1) capacidad requerida por el secador, (2) contenido de humedad, (3) tamaño medio de partícula, (4) sensibilidad a la temperatura, (5) cohesión y (6) fragilidad, del material a secar, se expresan en una escala lingüística de conjuntos difusos,

para la toma de decisiones del algoritmo. Por tanto, se puede definir una función de pertenencia, para cualquier elemento, con su valor comprendido entre 0 y 1, reflejando el grado al que pertenece un elemento. La Figura 1.41, representa una representación de la función de pertenencia, para el tamaño de partícula.

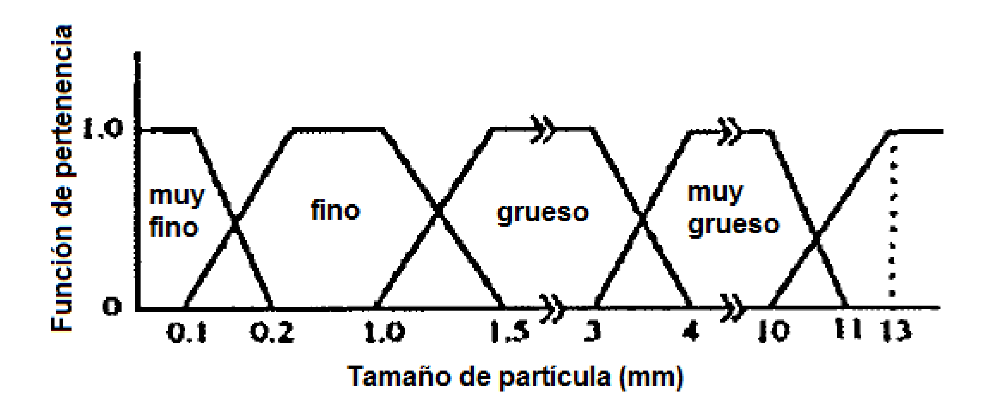


Figura 1.41. Función de pertenencia para el tamaño de partícula (Adaptado de Lababidi y Baker, 1999).

Para el caso de una alimentación de 120 kg/h, de un material sólido, de flujo libre, de temperatura máxima permisible de 60 ºC, 2 % de humedad de salida (bh), frágil, con una calificación de 50% en términos del valor monetario del producto, y apto para secado por convección, el sistema experto, recomendó como altamente posible, la utilización de secadores de bandeja múltiples, al vacío. El método de selección de Lababidi y Baker (1999), es mucho menos riguroso que el reportado por Kemp y Bahu (1995) y Kiranoudis *et al*. (1996), sin embargo, los autores declararon, que estarían incorporando más reglas e incluyendo secadores continuos, a partir de su publicación.

3. Pruebas de desempeño de secadores. Es recomendable someter el material a equipos similares a los que se van a adquirir, a una menor escala, ya que el transporte del material de interés, hasta las instalaciones, puede ser sumamente costoso, comparado con el resto de los gastos del proyecto. En esta etapa no solo se evalúa el desempeño del equipo, sino que se obtienen datos de las condiciones óptimas de secado.

Por ejemplo, en 20 pruebas de secado para la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo en Venezuela, llevadas a cabo en un secador rotatorio directo, con aire caliente, a cocorriente, a escala piloto, variando: (1) el flujo másico de aire seco en el secador, por unidad de área; (2) el ángulo de inclinación del secador y (3) la velocidad de rotación, y usando como variable de optimización, el cambio relativo de la humedad del sólido (masa de agua eliminada, con respecto a la masa de agua de entrada con el sólido, en términos porcentuales), se obtuvo como resultado que,

las condiciones óptimas, generaban un cambio relativo en la humedad del sólido de 95,76 %, y una eficacia térmica de 33,53 %. Dichas condiciones fueron, G/Ai_D de 0,1055 kg/(m^2·s), *s* de 5,76 μrad, y *ω* de 2,94 r/min (Faneite *et al*., 2007).

4. Selección final. Con los resultados de las pruebas de desempeño piloto y con cotizaciones de fabricante, se lleva a cabo un análisis técnico y una evaluación económica final, con lo cual, se debe seleccionar la mejor opción. La evaluación económica, se explicará en el Módulo 10, de cualquiera de los 3 los cursos avanzados, de este **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**.

6. Ubicación en el Programa

En este momento, están por terminar el módulo 1, de Introducción a los sistemas de secado industrial, que se aprecia en el esquema de la Figura 1.42, indicado con una flecha, solo a la espera de su participación en la evaluación. En el formato "on demand", se deberían haber superado los recuadros rellenos, esperando que su "*sed de formación fuera de lo tradicional*", tal como reza la declaración de intención de SECAVENCA, los impulse a egresar de todo el programa, hoy por hoy Diplomado, pudiendo ver en algún momento, todas las casillas rellenas, y teniendo en su haber nuevos conocimientos, habilidades, destrezas, y competencias, que los conviertan en los "*líderes de los cambios en la aplicación de la Ingeniería en América Latina y el Caribe, hacia un continente sostenible, con economía circular e hipocarbónico*", y merecedores del Diploma que otorga en conjunto **SECAVENCA**, **WorldWide Consulting & Training SpA** y la **International Standars for Education**.

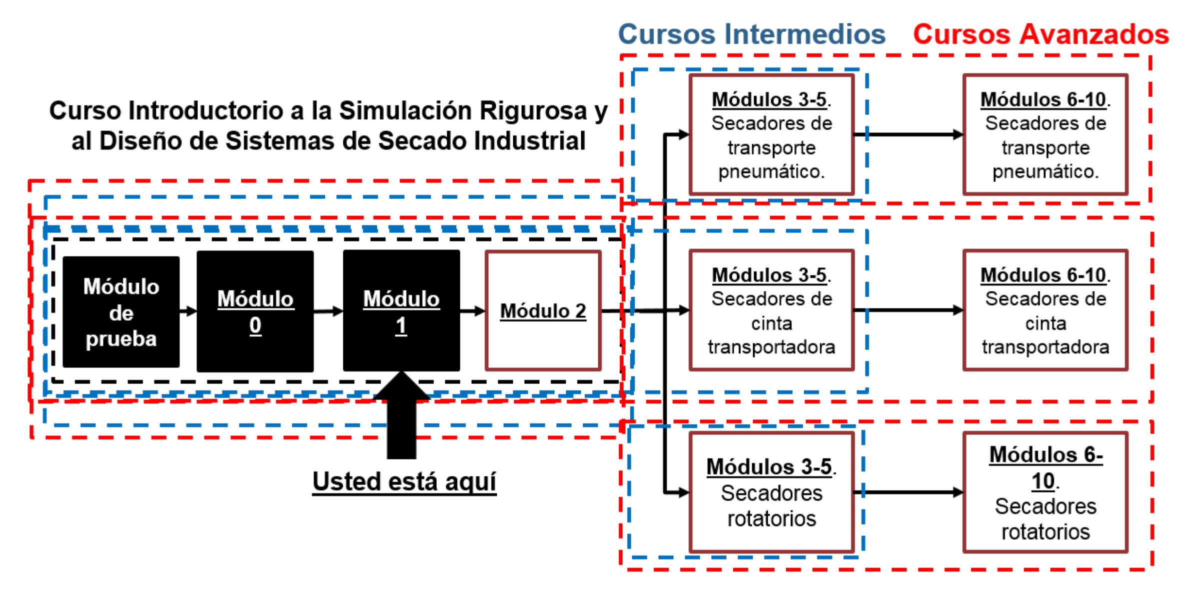


Figura 1.42. Ubicación en el programa, después de superar este módulo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acharjee, T. C., Coronella, C. J., Vásquez, V. R. (2011). Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. Bioresource technology, 102(7), 4849-4854.

Aralde, L., Paz, D., y Cárdenas, G. (1992). Metodología de cálculo de un secadero de bagazo en transporte Neumático. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, 69(2), 71-79. Argentina.

Aralde, L, Paz, D., y Cárdenas, G. (1993). Análisis del funcionamiento de un prototipo para secado de bagazo. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. 70(2), 7-14. Argentina.

Arinze, E. A., Schoenau, G. J., Sokhansanj, S., Adapa, P. (2003). Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems—a review and new concept. Drying Technology, 21(9), 1669-1698.

Arteaga, A., Choren, E., Sánchez, J. (2011). Introducción al Sistema Internacional de Unidades. Segunda Edición. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela: Editorial de la Universidad del Zulia (EDILUZ).

Baker, C. G. J. (1988). The design of flights in cascading rotary dryers. Drying Technology, 6(4), 631-653.

Barrueta, Y., Pacheco, J., Chourio, J., **Faneite, A.**, Hernández, I., Morales, K. (2014). Predicción de tiempos de residencia en secadores rotatorios. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Imelda Rincón Finol" "Investigamos e Innovamos para Venezuela". Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de septiembre de 2014. 1441 – 1446. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.3138.8482.

Bednarska, D. y Koniorczyk, M. (2020). Análisis térmico de agua confinada en pasta de cemento total y parcialmente saturada. En E3S Web of Conferences (Vol. 172, p. 17008). Ciencias EDP.

Bohnhoff, DR y Bohnhoff, RK (2019). Equilibrio del contenido de humedad de las cáscaras, cáscaras y granos de avellana. Transacciones de la ASABE, 62 (5), 1075-1086.

Boul, P. (2009, 30 de junio). Gestión por competencias. Diccionario de Competencias [Web log post]. URL: http://www.pablobuol.com/capacitacion/diccionario_de_competencias.htm

Brandini P., K. J., Toro Alonso, L. F., Prado Cornejo, F. E., Dal Fabbro, I. M., Park, K. J. (2010). Drying system designs: Global balance and costs. Journal of Food Process Engineering, 34, 2047–2077.

Callahan, J. C., Cleary, G. W., Elefant, M., Kaplan, G., Kensler, T., Nash, R. A. (1982). Equilibrium moisture content of pharmaceutical excipients. Drug Development and Industrial Pharmacy, 8(3), 355-369.

Chourio, J., Pacheco, J., Barrueta, Y., **Faneite, A.,** Hernández, I., Marrufo, B. (2014). Determinación experimental de tiempos de residencia en un secador rotatorio. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil “Dra. Imelda Rincón Finol” “Investigamos e Innovamos para Venezuela”. Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de septiembre de 2014. 1462 – 1469. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.1303.8408.

Cul, W. K., Douglas, W. J. M., Mujumdar, A. S. (1985). Impingement steam drying of paper. Drying Technology, 3(2), 307-320.

Faneite, A., Ferrer, A., Tudare, J., Cardozo, R. (2013). Biorrefinación de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo. Parte I. Acondicionamiento de Materia Prima. Boves, M, and Rincón, J. (Editores). Eutrofización del Lago de Maracaibo: Pasado, Presente y Perspectivas. Comisión permanente para el estudio de la cuenca del Lago de Maracaibo y gestión integral del agua. 225- 255. Depósito legal lfi18520135744193. ISBN: 978-980-402-147-3. DOI: 10.13140/2.1.4474.1449.

Faneite, A., Parra, J., Colón, W., Ferrer, A., Angós, I., Argüello, G. (2020). New thin-layer drying models for the design and simulation of cassava root dryers and phenomenological study of interaction water-starch during diffusion. International Food Research Journal. 27(1), 182 - 196.

Faneite, A., Pirela, J., Cardozo, R., Ferrer, A. (2007). Optimización de las variables de operación de un secador rotatorio continuo a escala piloto, en el secado de biomasa. 1er Congreso Científico Técnico de Ingeniería - LUZ. DOI: 10.13140/2.1.3081.5046.

Faneite, A. Rincón, A. Ferrer, A., Angós, I., Arguello, G. (2016). Mathematical modeling of thin layer drying of green plantain (*Musa paradisiaca* L.) peel. International Food Research Journal. 23(5), 2088-2095.

Hernández, I., **Faneite, A.,** Barrueta, Y., Pacheco, J., Chourio, J., Morales, K. (2014). Predicción de la retención en secadores rotatorio en función del tipo

de elevador. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Imelda Rincón Finol" "Investigamos e Innovamos para Venezuela". Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de septiembre de 2014. 1480 – 1487. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.2876.7043.

Hosseinabadi, H. Z., Layeghi, M., Berthold, D., Doosthosseini, K., Shahhosseini, S. (2014a). Mathematical modeling the drying of poplar wood particles in a closed-loop triple pass rotary dryer. Drying technology, 32(1), 55-67.

Hosseinabadi, H. Z., Layeghi, M., Doosthosseini, K., Berthold, D., Shahhosseini, S. (2014b). Simulation of Wood Particle Motion Through a Concurrent Triple-Pass Rotary Dryer. Drying technology, 32, 1409-1422.

Kamke, F. A., y Wilson, J. B. (1986a). Computer simulation of a rotary dryer. Part I: Retention time. AIChE Journal, 32(2), 263-268.

Kamke, F. A., y Wilson, J. B. (1986b). Computer simulation of a rotary dryer. Part II: Heat and mass transfer. AIChE Journal, 32(2), 269-275.

Kemp, I.C., y Bahu, R.E. (1995): A New Algorithm for Dryer Selection. Drying Technology: An International Journal, 13:5-7, 1563-1578.

Kim, Y. (2013). U.S. Patent No. 8,601,711 B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. (1996). Drying of solids: Selection of some continuous operation dryer types. Computers & chemical engineering, 20, S177-S182.

Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. Journal of Food engineering, 20(1), 55-74.

Lababidi, H. M., y Baker, C. G. (1999). An expert system for dryer selection using fuzzy logic. Computers & Chemical Engineering, 23, S691-S694.

Lam, P. S., Sokhansanj, S., Bi, X. T., Lim, C. J., Larsson, S. H. (2012). Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). Bioresource technology, 116, 396-402.

Masters, K. (1983) Designing fluid bed and spray dryers for low energy consumption, Drying Technology: An International Journal, 2:4, 521-549.

McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P. (1991). Operaciones de Transferencia de Masa. Cuarta Edición. España: McGraw–Hill/Interamericana.

Menezes, E. A., Finzer, J. R. D., Oliveira, D. L. (1998). A study of the drying performance of a vibrating tray dryer. Drying technology, 16(9-10), 1987-1998.

Montes de Oca R., N., y Machado R., E. F. (2014). Formación y desarrollo de competencias en la educación superior cubana. Humanidades Médicas 14(1), 145-159.

Montiel R., M. (2017). Diseño de una biorefinería para la producción de jarabe glucosado de bagazo de caña integrada a una central azucarera. Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia, para optar al Grado Académico de *Magister Scientiarum* en Ciencia y Tecnología de Alimentos. División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Motevali, A., y Chayjan, R. A. (2017). Effect of various drying bed on thermodynamic characteristics. Case studies in thermal engineering, 10, 399-406.

Mujumdar, A. S. (2000). Classification and selection of industrial dryers. Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments. Brossard, Canada: Exergex Corporation, 23-36.

Mujumdar, A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying. Tercera edición. Estados Unidos de Norteamérica: Taylor & Francis Group, LLC.

Pacheco, J., Barrueta, Y., Chourio, J., **Faneite, A.,** Hernández, I., López, Y. (2014). Análisis estadístico de resultados de transporte de sólidos dentro de un secador rotatorio. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Imelda Rincón Finol" "Investigamos e Innovamos para Venezuela". Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de septiembre de 2014. 1447 – 1453. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.2254.1120.

Pérez D., R. (2002). Sistema Internacional de Unidades SI. Revista de Obstetricia y Ginecología de Venezuela, 62(1). Caracas (Venezuela), marzo de 2002. ISSN 0048-7732

Perry, R. H. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook. En Perry, R. H., Green, D. W. & Maloney, J. O. (Eds.). Séptima edición. Estados Unidos de Norteamérica: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Poozesh, S., Lu, K., y Marsac, P. J. (2018). On the particle formation in spray drying process for bio-pharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics. International Journal of Heat and Mass Transfer, 122, 863-876.

Roe, M., Church, S., Pinchen, H., Finglas, P. (2013). Nutrient analysis of fruit and vegetables. Analytical report. Department of Health. Reino Unido. URL: http://www.dh.gov.uk/publications

Sanni, L. A., Oke, O. O., Oladimeji, F. M., Ogbozomivaze, K. F. (2016). Thermal properties and energy utilization of cassava meal in conductive rotary drying. American Journal of Food Science and Technology, 4(6), 160-167.

Treybal, R. E. (2001). Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. México: McGraw–Hill Book Co.

Waje, S. S., Thorat, B. N., Mujumdar, A. S. (2007). Screw conveyor dryer: Process and equipment design. Drying Technology, 25(1), 241-247.

Wenger, H. (1984). U.S. Patent No. 4,477,984. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.